



TESIS - RC 185401

**ANALISIS NONLINEAR SAMBUNGAN BALOK-KOLOM
BAJA *COLD-FORMED* PADA HUNIAN TETAP ITS YANG
TAHAN GEMPA**

**MUHAMAD FAUZAN AKBARI
6012211071**

Dosen Pembimbing
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022



TESIS - RC 185401

**ANALISIS NONLINEAR SAMBUNGAN BALOK-KOLOM
BAJA *COLD-FORMED* PADA HUNIAN TETAP ITS YANG
TAHAN GEMPA**

**MUHAMAD FAUZAN AKBARI
6012211071**

Dosen Pembimbing
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022



TESIS - RC 185401

NONLINEAR ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL BEAM-COLUMN CONNECTIONS IN ITS EARTHQUAKE-RESISTANT PERMANENT HOUSING

MUHAMAD FAUZAN AKBARI
6012211071

Supervisor
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

Department of Civil Engineering
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

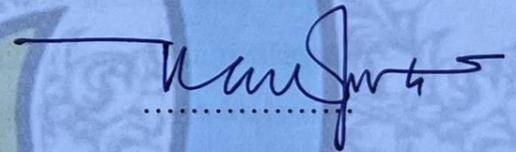
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MUHAMAD FAUZAN AKBARI
NRP: 6012211071

Tanggal Ujian : 28 Juni 2022
Periode Wisuda : September 2022

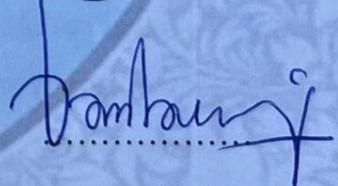
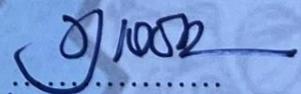
Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198004302005011002
2. Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.
NIP. 195902131987011001



Penguji:

1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197301281998021002
2. Dr. Asdam Tambusay, ST.
NIP. 1990201911077



Dr. Techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.
NIP. 197212021998021001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS NONLINEAR SAMBUNGAN BALOK-KOLOM BAJA *COLD-FORMED* PADA HUNIAN TETAP ITS YANG TAHAN GEMPA

Mahasiswa : Muhamad Fauzan Akbari
NRP : 6012211071
Pembimbing 1 : Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

ABSTRAK

Institut Teknologi Sepuluh Nopember berencana mengembangkan bantuan berupa hunian tetap (HunTap) untuk masyarakat yang terdampak gempa. Untuk mewujudkan rencana itu dibutuhkan konstruksi yang efisien dan tahan gempa. Material yang sesuai terhadap kebutuhan tersebut adalah baja *cold-formed*. Sifat materialnya yang ringan menawarkan kemudahan, kecepatan dalam pelaksanaan, dan keunggulan dalam desain tahan gempa. Agar struktur baja *cold-formed* tahan gempa, struktur harus memiliki daktilitas yang cukup. Dalam sistem rangka pemikul momen, balok didesain untuk mampu berdeformasi secara inelastis sehingga menghasilkan daktilitas yang cukup. Oleh karenanya diperlukan *detailing* pada elemen sambungan balok-kolom yang dapat mengakomodir kebutuhan daktilitas pada struktur. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *stiffener* dapat meningkatkan daktilitas dan energi disipasi balok. Selain itu terdapat studi yang menunjukkan bahwa elemen *gusset plate* dapat meningkatkan kekakuan awal dari sambungan dan rangka CFS menghasilkan daktilitas dan energi disipasi yang baik. Oleh karena itu, penelitian ini akan memberikan usulan desain sambungan dengan mengevaluasi pengaruh dari beberapa variasi konfigurasi *stiffener* balok terhadap perilaku sambungan. Penelitian ini bersifat analitik dengan menggunakan permodelan numerik *Sub-Assemblage* berbasis *finite element* menggunakan *software* Abaqus.

Metodologi penilitan terdiri dari dua tahapan. Tahap pertama yaitu melakukan validasi model numerik dengan penelitian eksperimental terdahulu. Tahap selanjutnya adalah memodelkan dan menganalisis spesimen sambungan

dengan beberapa konfigurasi *stiffener*. Jumlah spesimen yang diteliti adalah 8 model berdasarkan jumlah dan posisi pemasangan *stiffener* yaitu : Tanpa *stiffener* (S1), 2 vertikal *stiffener* (S2), 3 vertikal *stiffener* (S3), 3 vertikal dan 1 horizontal *stiffener* (S4), 4 vertikal *stiffener* (S5), 5 vertikal *stiffener* (S6), 6 vertikal *stiffener* (S7), dan 3 vertikal dan X *stiffener* (S8). Perilaku yang dianalisis dari sambungan meliputi kurva momen-rotasi, kapasitas momen, daktilitas, energi disipasi, dan pola keruntuhan.

Hasil analisis menunjukkan konfigurasi *stiffener* dengan bentuk X (S8) menghasilkan perilaku sambungan yang optimal dari konfigurasi lainnya. Spesimen S8 memiliki kapasitas momen terbesar dari model lainnya yaitu sebesar 36,153 kNm dengan peningkatan sebesar 11,66% terhadap spesimen S1. Spesimen S8 memiliki daktilitas terbesar dari model lainnya, yaitu sebesar 4,04 dengan peningkatan sebesar 59,109% terhadap spesimen S1. Spesimen S8 memiliki kapasitas energi disipasi terbesar dari model lainnya, yaitu sebesar 10 kNm-rad dengan peningkatan sebesar 62,842% terhadap spesimen S1.

Kata Kunci: Huntap ITS, Kapasitas Sambungan, Konfigurasi *Stiffener*, Metode Elemen Hingga, Sambungan Balok-Kolom Baja *Cold-formed*.

NONLINEAR ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL BEAM-COLUMN CONNECTIONS IN ITS EARTHQUAKE-RESISTANT PERMANENT HOUSING

Student : Muhamad Fauzan Akbari
Student Identity Number : 6012211071
Supervisor : Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Supervisor : Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

ABSTRACT

Institute of Technology Sepuluh Nopember plans to develop assistance in the form of permanent housing (Huntap) for communities affected by the earthquake. To realize the plan, an efficient and earthquake-resistant construction is needed. The material suitable for these needs is cold-formed steel. The lightweight characteristic of the material offers easiness, speed in execution, and excellence in earthquake-resistant design. For a cold-formed steel structure can withstand earthquakes, it must have sufficient ductility. In the moment resisting frame system, the beam is designed to be able to deform inelastically to produce sufficient ductility. Therefore, it is necessary to detail the beam-column connection elements that can accommodate the ductility requirements of the structure. Previous studies have shown that the use of stiffeners can increase the ductility and energy dissipation of beams. In addition, there are studies showing that gusset plate elements can increase the initial stiffness of CFS joints and frames resulting in good ductility and energy dissipation. Therefore, this study will propose a connection design by evaluating the effect of several variations of beam stiffener configuration on the behavior of the connection. This analytical research uses finite element based Sub-Assemblage numerical modeling using ABAQUS software.

The research methodology consists of two stages. The first stage is to validate the numerical model with previous experimental research. The next step is to model and analyze the connection specimens with several stiffener configurations. The number of specimens studied was 8 models based on the

number and position of stiffener installation, namely: without stiffener (S1), 2 vertical stiffeners (S2), 3 vertical stiffeners (S3), 3 vertical and 1 horizontal stiffeners (S4), 4 vertical stiffeners (S5), 5 vertical stiffeners (S6), 6 vertical stiffeners (S7), and 3 vertical and X stiffeners (S8). The analyzed behavior of the connection includes the rotational moment curve, moment capacity, ductility, energy dissipation, and failure pattern.

The analysis results show that the stiffener configuration with X shape (S8) produces optimal connection behaviour from other configurations. Specimen S8 has the largest moment capacity of the other models, which is 36,153 kNm with an increase of 11,66% over specimen S1. Specimen S8 has the greatest ductility of the other models, which is 3,725, increasing 59,109% over specimen S1. Specimen S8 has the largest energy dissipation capacity of the other models, which is 10 kNm-rad, increasing 62,842% over specimen S1.

Keywords: Huntap ITS, Stiffener Configuration, Finite Element Method, Cold-formed Steel Beam-Column Connection.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat-Nya, Penyusun dapat menyelesaikan laporan Tesis ini dengan judul “ **Analisis Nonlinear Sambungan Balok-Kolom Baja Cold-Formed Pada Hunian Tetap ITS Yang Tahan Gempa** ” tepat pada waktunya.

Dalam penyusunan laporan Tesis ini, penulis mengalami banyak kendala dan kesulitan, akan tetapi atas bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak tugas ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu izinkan penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan baik dengan doa ataupun materiil, serta motivasi untuk menyelesaikan Tesis Ini.
2. Bapak Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tesis yang selalu memberikan masukan, bimbingan, dan motivasi dalam penyusunan Tesis ini.
3. Bapak Dr. Ir. Djoko Irawan, MS. selaku dosen pembimbing kedua yang memberikan masukan, bimbingan, dan motivasi dalam penyusunan Tesis ini.
4. Teman-teman Departemen Teknik Sipil ITS angkatan 2020 dan 2021 yang telah mendukung kami dalam penulisan laporan ini.

Dalam penulisan laporan ini, Penyusun menyadari bahwa masih banyak kekurangan. Kritik dan saran yang bersifat membangun sangat kami harapkan demi kebaikan laporan ini. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan terutama penulis.

Surabaya, 20 Juli 2022

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan.....	4
1.5. Manfaat.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Jenis Sambungan dan Sistem Struktur Baja <i>Cold-formed</i>	7
2.2. <i>Cold-formed Steel-Special Bolted Moment Frame (CFS-SBMF)</i>	11
2.3. Pengaruh Jenis Penampang Balok <i>Cold-formed Steel</i>	12
2.4. Pengaruh <i>Gusset Plate</i>	15
2.5. Pengaruh <i>Stiffner</i> pada Elemen Balok.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1. Diagram Alir.....	19
3.2. Pengumpulan Data dan Studi Literatur.....	20
3.3. Validasi Numerik Sambungan <i>CFS-Special Bolted Moment Frame</i>	21

3.4.	Permodelan Spesimen Sambungan Balok-Kolom <i>Cold-formed</i>	24
3.5.	Prosedur Permodelan dengan Menggunakan Program Bantu Abaqus....	29
3.6.	Evaluasi Hasil Permodelan.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		43
4.1.	Umum.....	43
4.2.	Permodelan sambungan validasi dengan Abaqus	43
4.3.	Hasil permodelan sambungan validasi dengan Abaqus	49
4.4.	Verifikasi Hasil Permodelan Abaqus dengan Hasil Eksperimen	50
4.5.	Analisis Spesimen	52
4.5.1.	Analisis Spesimen Sambungan Tanpa <i>Stiffener</i> (S1).....	52
4.5.2.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 2 Vertikal <i>Stiffener</i> (S2) ...	58
4.5.3.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal <i>Stiffener</i> (S3) ...	63
4.5.4.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal dan 1 Horizontal <i>Stiffener</i> (S4)	69
4.5.5.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 4 Vertikal <i>Stiffener</i> (S5) ...	74
4.5.6.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 5 Vertikal <i>Stiffener</i> (S6) ...	79
4.5.7.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 6 Vertikal <i>Stiffener</i> (S7) ...	85
4.5.8.	Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal dan X <i>Stiffener</i> (S8).....	90
4.6.	Interpretasi Hasil Analisis	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		103
5.1.	Kesimpulan.....	103
5.2.	Saran.....	104
DAFTAR PUSTAKA.....		105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>CFS light-frame shear walls sheathed with wood structural panels</i> (Liu, Peterman and Schafer, 2014)	8
Gambar 2.2 <i>CFS light-frame shear walls sheathed with steel sheet sheathing</i> (Yu, 2010)	9
Gambar 2.3 <i>CFS light-frame strap-braced wall systems</i> (Fiorino dkk., 2016).....	9
Gambar 2.4 <i>CFS special bolted moment frames</i> (Kaling dkk., 2015)	9
Gambar 2.5 <i>CFS light-frame shear walls sheathed with gypsum board</i> (Macillo dkk., 2017)	10
Gambar 2.6 <i>Conventional construction CFS light-frame strap braced wall systems</i>	10
Gambar 2.7 Histeresis respon spesimen SBMF dalam pengujian siklik oleh (Uang dkk., 2008)	11
Gambar 2.8 (a) Geometri spesimen, (b) penampang <i>double back-to-back lipped channel</i> pada studi balok CFS oleh (Calderoni dkk., 2009)	12
Gambar 2.9 (a) Plastic rotation pada spesimen T01, (b) Kurva histeresi pengetesan siklik spesimen pada studi balok CFS oleh (Calderoni dkk., 2009)	13
Gambar 2.10 Grafik momen-rotasi pada beberapa spesimen penampang balok CFS (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a).....	13
Gambar 2.11 Perbandingan daktilitas dan energi disipasi beberapa penampang CFS (Ye dkk., 2018)	14
Gambar 2.12 Kurva momen-rotasi balok beberapa penampang balok (Ye dkk., 2018).....	15
Gambar 2.13 Detail spesimen dengan beberapa tipe <i>gusset plate</i> (Chung and Lau, 1999)	15
Gambar 2.14 Konfigurasi <i>stiffner</i> pada spesimen studi eksperimental (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a).....	17
Gambar 3.1 Flowchart metodologi penelitian.....	20
Gambar 3.2 Dimensi dan konfigurasi spesimen uji (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)	21

Gambar 3.3	Skema pengetesan pada sambungan (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)	22
Gambar 3.4	Kurva <i>plastic stress-strain</i> balok dan <i>gusset plate</i> (Bagheri Sabbagh dkk., 2012)	23
Gambar 3.5	Pembebanan siklik (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)	23
Gambar 3.6	Momen kurvatur model validasi (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)	24
Gambar 3.7	Detail <i>gusset plate</i> , penampang kolom dan balok spesimen	26
Gambar 3.8	Spesimen S1	26
Gambar 3.9	Spesimen S2	27
Gambar 3.10	Spesimen S3	27
Gambar 3.11	Spesimen S4	27
Gambar 3.12	Spesimen S5	28
Gambar 3.13	Spesimen S6	28
Gambar 3.14	Spesimen S7	28
Gambar 3.15	Spesimen S8	28
Gambar 3.16	Menu <i>part</i> Abaqus	29
Gambar 3.17	Permodelan elemen sambungan (a) Balok, (b) kolom, (c) <i>gusset plate</i> , (d) <i>stiffener balok</i>	30
Gambar 3.18	Menu <i>property</i> Abaqus	30
Gambar 3.19	Input <i>material behaviour</i> (a) <i>density</i> , (b) <i>elastic behaviour</i> , (c) <i>plastic behaviour</i>	31
Gambar 3.20	<i>Assembly</i> elemen-elemen sambungan	32
Gambar 3.21	Partisi pada elemen sambungan (a) Partisi balok, (b) partisi pada kolom, (c) partisi pada <i>gusset plate</i>	32
Gambar 3.22	Menu <i>step</i> Abaqus	33
Gambar 3.23	Pendefinisian <i>step</i>	33
Gambar 3.24	Fitur <i>find contact pair</i>	34
Gambar 3.25	<i>Contact property</i> (a) <i>contact property options</i> , (b) <i>normal behavior</i> , (c) <i>tangential behavior</i>	34
Gambar 3.26	<i>Constraint</i> sambungan	35
Gambar 3.27	Permodelan baut dengan menggunakan fitur <i>point based fastener</i>	35
Gambar 3.28	<i>Boundary condition</i> sambungan	36

Gambar 3.29 Pembebanan Siklik.....	36
Gambar 3.30 <i>Mesh</i> dari elemen sambungan	37
Gambar 3.31 <i>Geometrical Imperfection</i>	38
Gambar 3.32 <i>Running analysis</i> pada <i>Job Abaqus</i>	39
Gambar 3.33 Skema penentuan nilai rotasi untuk perhitungan daktilitas.....	40
Gambar 3.34 Skema penentuan kekakuan awal.....	41
Gambar 3.35 Skema penentuan kekakuan sekan dan kekakuan awal	Error!

Bookmark not defined.

Gambar 4.1 Permodelan elemen sambungan validasi (a) Balok, (b) kolom, (c) <i>gusset plate</i> , (d) <i>stiffener</i> kolom, (e) <i>stiffener</i> balok.....	44
Gambar 4.2 Input kurva <i>stress-plastic strain</i> material sambungan validasi	44
Gambar 4.3 <i>Assembly</i> elemen-elemen sambungan validasi.....	44
Gambar 4.4 <i>Boundary condition</i> dan <i>constraint</i> sambungan validasi	46
Gambar 4.5 Langkah melakukan <i>eigenvalue buckling analysis</i> (a) membuat <i>copy</i> model, (b) <i>replace</i> step pembebanan, (c) beban terpusat	47
Gambar 4.6 <i>Command</i> dalam <i>eigenvalue buckling analysis</i> (a) <i>command</i> dalam <i>copy model</i> , (b) <i>command</i> dalam file model utama	48
Gambar 4.7 Bentuk <i>geometry imperfection</i> (a) mode 1 dan (b) mode 2.....	48
Gambar 4.8 Deformasi maksimum sambungan validasi.....	49
Gambar 4.9 Kontur tegangan sambungan validasi	49
Gambar 4.10 Kurva histeresis sambungan validasi	49
Gambar 4.11 Perbandingan kurva momen rotasi hasil permodelan Abaqus dan hasil eksperimental oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012)	51
Gambar 4.12 Perbandingan pola keruntuhan antara (a) hasil permodelan Abaqus dan (b) hasil eksperimental oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012)	52
Gambar 4.13 Detail 2D sambungan spesimen S1	53
Gambar 4.14 Permodelan numerik 3D spesimen S1	53
Gambar 4.15 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S1.....	54
Gambar 4.16 Kondisi sambungan spesimen S1 saat terjadi pelelehan pertama ...	55
Gambar 4.17 Pola keruntuhan sambungan S1 pada akhir fase pembebanan	56
Gambar 4.18 Area disipasi energi spesimen S1	57
Gambar 4.19 Detail 2D sambungan spesimen S2.....	58

Gambar 4.20 Permodelan numerik 3D spesimen S2	58
Gambar 4.21 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S2	60
Gambar 4.22 Kondisi sambungan spesimen S2 saat terjadi pelelehan pertama....	60
Gambar 4.23 Pola keruntuhan sambungan S2 pada akhir fase pembebanan	61
Gambar 4.24 Area disipasi energi spesimen S2	62
Gambar 4.25 Detail 2D sambungan spesimen S3	64
Gambar 4.26 Permodelan numerik 3D spesimen S3.....	64
Gambar 4.27 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S3	65
Gambar 4.28 Kondisi sambungan spesimen S1 saat terjadi pelelehan pertama....	66
Gambar 4.29 Pola keruntuhan sambungan S3 pada akhir fase pembebanan	67
Gambar 4.30 Area disipasi energi spesimen S3	68
Gambar 4.31 Detail 2D sambungan spesimen S4	69
Gambar 4.32 Permodelan numerik 3D spesimen S4.....	69
Gambar 4.33 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S4.....	71
Gambar 4.34 Kondisi sambungan spesimen S4 saat terjadi pelelehan pertama....	71
Gambar 4.35 Pola keruntuhan sambungan S4 pada akhir fase pembebanan	72
Gambar 4.36 Area disipasi energi spesimen S4	73
Gambar 4.37 Detail 2D sambungan spesimen S5	74
Gambar 4.38 Permodelan numerik 3D spesimen S5.....	75
Gambar 4.39 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S5	76
Gambar 4.40 Kondisi sambungan spesimen S5 saat terjadi pelelehan pertama....	77
Gambar 4.41 Pola keruntuhan sambungan S5 pada akhir fase pembebanan	78
Gambar 4.42 Area disipasi energi spesimen S5	79
Gambar 4.43 Detail 2D sambungan spesimen S6	80
Gambar 4.44 Permodelan numerik 3D spesimen S6.....	80
Gambar 4.45 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S6.....	81
Gambar 4.46 Kondisi sambungan spesimen S6 saat terjadi pelelehan pertama....	82
Gambar 4.47 Pola keruntuhan sambungan S6 pada akhir fase pembebanan	83
Gambar 4.48 Area disipasi energi spesimen S6	84
Gambar 4.49 Detail 2D sambungan spesimen S7	85
Gambar 4.50 Permodelan numerik 3D spesimen S7.....	85
Gambar 4.51 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S7	86

Gambar 4.52 Kondisi sambungan spesimen S7 saat terjadi pelelehan pertama ...	88
Gambar 4.53 Pola keruntuhan sambungan S7 pada akhir fase pembebanan	88
Gambar 4.54 Energi disipasi spesimen S7	89
Gambar 4.55 Detail 2D sambungan spesimen S8	90
Gambar 4.56 Permodelan numerik 3D spesimen S8	90
Gambar 4.57 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S8.....	91
Gambar 4.58 Kondisi sambungan spesimen S8 saat terjadi pelelehan pertama ...	92
Gambar 4.59 Pola keruntuhan sambungan S8 pada akhir fase pembebanan	93
Gambar 4.60 Pola keruntuhan sambungan S8 pada akhir fase pembebanan	94
Gambar 4.61 Perbandingan kapasitas momen sambungan	95
Gambar 4.62 Perbandingan kapasitas momen sambungan	96
Gambar 4.63 Perbandingan daktilitas sambungan	98
Gambar 4.64 Perbandingan energi disipasi sambungan	99
Gambar 4.65 Perbandingan <i>initial stiffness</i> sambungan	100
Gambar 4.66 Penurunan kekuatan sambungan	100
Gambar 4.67 Penurunan kekakuan sambungan	101

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rekapitulasi hasil pengujian sambungan dengan beberapa tipe <i>gusset plate</i> (Chung and Lau, 1999).....	16
Tabel 2.2 Parameter stiffener pada studi experimental oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a)	17
Tabel 3.1 Spesimen uji pada penelitian (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b).....	21
Tabel 3.2 Spesimen sambungan balok-kolom CFS <i>bolted moment frame</i>	25
Tabel 3.3 Material yang digunakan pada spesimen	26
Tabel 4.1 Kapasitas Spesimen Sambungan S1.....	57
Tabel 4.2 Kapasitas Spesimen Sambungan S2	63
Tabel 4.3 Kapasitas Spesimen Sambungan S3	68
Tabel 4.4 Kapasitas Spesimen Sambungan S4	74
Tabel 4.5 Kapasitas Spesimen Sambungan S5	79
Tabel 4.6 Kapasitas Spesimen Sambungan S6	84
Tabel 4.7 Kapasitas Spesimen Sambungan S7	89
Tabel 4.8 Kapasitas Spesimen Sambungan S8	95
Tabel 4.9 Presentase peningkatan kapasitas momen tiap spesimen.....	97
Tabel 4.10 Presentase peningkatan daktilitas tiap spesimen.....	98
Tabel 4.11 Presentase peningkatan energi disipas tiap spesimen	99

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui Pusat Penelitian Mitigasi Kebencanaan dan Perubahan Iklim (Puslit MKPI) mempunyai visi untuk mengurangi resiko bencana melalui berbagai riset keilmuan dengan harapan dapat menjadi solusi bagi masyarakat yang terdampak akibat bencana, tidak terkecuali bencana gempa (Puslit-MKPI, 2021). Selama ini bantuan ITS kepada masyarakat yang terdampak gempa adalah berupa hunian sementara (Huntara), dimana hunian ini tersusun dari material kayu, bambu, triplek yang dinilai kurang layak dan kurang nyaman serta memiliki usia pakai yang relatif singkat, sehingga ITS berencana mengembangkan bantuan berupa hunian tetap (Huntap) untuk masyarakat yang terdampak gempa (Puslit-MKPI, 2021). Huntap yang direncanakan ini dibangun dengan beberapa batasan yang antara lain : tahan terhadap gempa, murah, dan cepat. Salah satu material yang sesuai untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah baja *cold-formed* atau baja canai dingin (Landolfo, 2011).

Material baja canai dingin mudah ditemui dan banyak tersedia dipasaran. Di Indonesia, baja canai dingin sudah banyak digunakan pada komponen struktur atap seperti dak, gording, dan reng. Akan tetapi seiring berkembangnya kreativitas dan inovasi maka munculah konsep penggunaan material baja canai dingin sebagai material struktur utama bangunan. Di negara maju seperti Amerika Serikat, Kanada, Australia, dan beberapa negara Eropa konsep tersebut telah digunakan dan diaplikasikan pada perumahan dan gedung-gedung komersial bertingkat rendah (Mazzolani dkk., 2019). Namun di Indonesia penggunaan baja canai dingin sebagai material struktur utama masih sedikit. Hal ini lah yang menyebabkan semakin meningkatnya penelitian tentang baja canai dingin di Indonesia.

Cold-formed steel (CFS) merupakan jenis baja yang dibuat dari lembaran pelat baja tipis (berkisar diantara 0,4 dan 6,4 mm) yang dibentuk ketika dingin dengan bantuan mesin roll-forming (Vallabhy dkk., 2008). Sifat materialnya yang ringan menawarkan kemudahan, kecepatan dalam pelaksanaan, dan keunggulan dalam desain tahan gempa (Landolfo, 2011). Selain itu keunggulan baja canai

dingin dari material lain adalah rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi (Billah, Islam and Bin, 2019). Akan tetapi karena materialnya yang tipis elemen baja canai dingin rentan terhadap tekuk lokal, distorsional, dan global (Billah, Islam and Bin, 2019). Keterbatasan lainnya yaitu rendahnya kekakuan luar bidang yang menyebabkan elemen baja canai dingin memiliki daktilitas yang rendah (Bagheri Sabbagh dkk., 2011). Kelemahan-kelemahan tersebut yang menjadi tantangan tersendiri dalam mendesain struktur baja canai dingin yang tahan gempa.

Daktilitas merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi dalam perencanaan struktur tahan gempa. Daktilitas menunjukkan keandalan struktur dalam menerima beban gempa dengan respon inelastis. Dengan perencanaan daktilitas yang baik, struktur akan menjadi lebih efisien dan tidak boros. Daktilitas sangat erat hubungannya dengan nilai faktor reduksi gempa (R), semakin besar daktilitas nilai faktor reduksi gempa (R) akan semakin besar, sehingga reduksi gaya gempa pada struktur juga semakin besar. Untuk merencanakan struktur baja canai dingin yang tahan gempa, struktur harus memiliki daktilitas yang cukup dalam menahan gempa agar struktur menjadi lebih efisien. Salah satu usaha untuk mencapai tingkat daktilitas tersebut adalah dengan melakukan *detailing* pada elemen-elemen struktur.

Elemen utama struktur yang menyusun sistem rangka pemikul momen adalah balok, kolom, dan sambungan balok-kolom. Dalam sistem tersebut balok didesain untuk mampu berdeformasi secara inelastis sehingga menghasilkan daktilitas yang cukup. Sementara elemen lainnya didesain lebih kuat dari elemen balok. Dengan mekanisme tersebut energi gempa yang masuk pada struktur dapat terdisipasi dengan baik, sehingga meminimalisir resiko kegagalan pada keseluruhan struktur. Konsep deformasi inelastis atau pelelehan pada balok digunakan sebagai mekanisme sekering pada perencanaan hunian tetap ITS yang tahan gempa. Oleh karena itu diperlukan *detailing* pada elemen sambungan balok-kolom yang dapat mengakomodir kebutuhan daktilitas pada struktur.

Beberapa studi mengenai *detailing* elemen sambungan balok-kolom untuk mengoptimalkan daktilitas pada struktur baja canai dingin telah dilakukan sebelumnya. Diantaranya pengoptimalan dilakukan pada pemilihan jenis penampang balok CFS (Bagheri Sabbagh dkk., 2011), penambahan elemen *gusset*

plate pada sambungan (Chen, Huo and Xing, 2020), serta penambahan horizontal dan vertikal *stiffner* pada balok (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b). Studi tentang pengembangan elemen balok CFS untuk mendisipasi energi gempa telah dilakukan salah satunya oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2011), menunjukkan bahwa profil CFS dengan sayap lengkung memiliki kapasitas energi disipasi gempa yang cukup dan dapat menunda kegagalan tekuk lokal pada balok (Bagheri Sabbagh dkk., 2011). Akan tetapi jenis penampang tersebut akan cukup sulit untuk dimanufaktur sehingga perlu dicari alternatif penampang lain yang lebih mudah untuk dibuat. Berdasarkan (Calderoni dkk., 2009), CFS *back to back channel* memiliki daktilitas dan energi disipasi yang tidak dapat diabaikan, yang mana dapat dipertimbangkan dalam desain struktur CFS tahan gempa. Walaupun desain plastis pada elemen balok tidak diperbolehkan dalam peraturan (AISI S400, 2015), namun potensi tersebut dapat dipelajari untuk mengetahui perilakunya dibawah pengaruh gempa. Studi terkait pengaruh *gusset plate* pada sambungan *bolted moment frame* juga telah dilakukan oleh Chen dkk, dari studi tersebut ketebalan *gusset plate* dapat meningkatkan kekakuan awal dari rangka, dengan ketebalan 8-12 mm kekakuan awal meningkat hingga 28,86%, selain itu didapatkan rangka CFS memiliki daktilitas dan energi disipasi yang baik (Chen, Huo and Xing, 2020). Selain *gusset plate*, sambungan dengan menggunakan pelat tembus juga diteliti oleh Bagheri Sabbagh dkk, didapatkan bahwa sambungan balok-kolom dengan pelat tembus memiliki kekuatan dan daktilitas yang cukup apabila desain plastis pada balok diperbolehkan (Bagheri Sabbagh dkk., 2011). Studi eksperimental pengaruh horizontal-vertikal *stiffner* pada elemen balok dilakukan oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b), dari hasil eksperimen tersebut didapatkan bahwa penggunaan *stiffner* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan daktilitas elemen balok.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka studi ini dilakukan untuk memperoleh desain sambungan balok-kolom yang memiliki daktilitas cukup sebagai usulan sambungan pada hunian tetap ITS yang tahan gempa. Beberapa spesimen sambungan balok-kolom CFS akan dibuat sesuai dengan parameter yang dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya. Parameter tersebut adalah pengaruh variasi konfigurasi *stiffner* pada balok CFS. Dari spesimen yang telah dibuat dan dianalisis perilakunya akan dipilih sambungan yang memiliki kinerja paling

optimum yang akan direkomendasikan pada program Huntap ITS. Perilaku yang dianalisis dari sambungan meliputi kapasitas momen, daktilitas, kurva histeresis, pola keruntuhan, dan kualifikasi sambungan. Penelitian ini bersifat analitik dengan menggunakan program numerik berbassis *finite element* yaitu Abaqus.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tesis ini adalah :

1. Bagaimana melakukan permodelan numerik sambungan balok-kolom baja *cold-formed* pada program Abaqus ?
2. Bagaimana konfigurasi *stiffener* untuk sambungan balok-kolom CFS yang menghasilkan kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi yang optimal ?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan *stiffener* pada elemen sambungan balok-kolom CFS terhadap kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan ?

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Tidak melakukan penelitian eksperimental di laboratorium.
2. Sambungan digunakan pada rumah sederhana (Huntap ITS) untuk 1 hingga 3 lantai dengan batasan profil balok adalah *double back-to-back lipped channel* 150x65x20, sedangkan untuk kolom digunakan profil *double back-to-back lipped channel* 200x75x20 masing-masing dengan ketebalan 3,2 mm.
3. Program *finite element* yang digunakan adalah Abaqus dengan permodelan berupa *subassembly* balok-kolom.
4. Studi ini tidak meninjau sambungan balok-kolom diarah transversal.

1.4. Tujuan

Adapun tujuan utama yang akan dibahas pada tesis ini adalah :

1. Diperoleh usulan konfigurasi *stiffener* pada sambungan balok-kolom CFS yang dapat digunakan pada program hunian tetap ITS.
2. Dapat diketahui pengaruh variasi konfigurasi *stiffner* pada elemen balok CFS terhadap perilaku kapasitas momen, daktilitas, kurva histeresis, pola keruntuhan, dan kualifikasi sambungan.

1.5. Manfaat

Manfaat yang diharapkan muncul dari penelitian ini antara lain :

1. Pembaca dapat memperoleh rekomendasi desain sambungan balok-kolom CFS tahan gempa untuk hunian sederhana 1-3 lantai dengan batasan profil yang ada.
2. Dapat mewujudkan tujuan ITS dalam menciptakan hunian tetap yang tahan gempa untuk membantu masyarakat yang kehilangan rumahnya akibat bencana gempa.
3. Diharapkan dapat mendorong penggunaan *cold-formed steel* sebagai material utama dalam konstruksi *low-rise building* yang tahan gempa di Indonesia.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Jenis Sambungan dan Sistem Struktur Baja *Cold-formed*

Struktur baja merupakan struktur yang tersusun dari elemen balok-kolom yang disatukan dengan elemen sambungan sehingga struktur dapat menjadi satu kesatuan yang kokoh. Elemen sambungan memiliki peranan penting dalam meneruskan gaya-gaya dari balok seperti aksial, geser, dan momen menuju kolom ataupun sebaliknya. Pada struktur baja *cold-formed* terdapat beberapa tipe sambungan yang dapat digunakan. Sebagaimana yang telah dijelaskan oleh (Komara, Wahyuni and Suprobo, 2017) dalam jurnalnya yang berjudul “*A study on Cold-formed Steel Frame Connection: A review*” jenis sambungan pada struktur baja ringan adalah sebagai berikut :

1. Sambungan sekrup

Sekrup adalah jenis sambungan yang umum digunakan pada struktur baja ringan. Sambungan sekrup merupakan metode sambungan yang sederhana dan mudah untuk dilaksanakan karena elemen CFS yang tipis. Penggunaan sambungan sekrup akan sesuai apabila ketebalan elemen tidak mempersulit proses *self-drilling* sekrup (Komara dkk., 2017).

2. Sambungan baut

Sambungan baut merupakan tipe sambungan yang umum digunakan pada struktur baja yang dapat diaplikasikan pada baja *hot rolled* atau baja *cold-formed* (Komara dkk., 2017). Sambungan baut pada struktur baja *cold-formed* umumnya digunakan untuk menyambungkan elemen CFS yang lebih tebal (Nadya and Usman, 2018).

3. Sambungan las

Sambungan las dapat memberikan perilaku yang rigid antara elemen CFS yang disambung. Dalam pelaksanaannya dibutuhkan tenaga khusus (Komara dkk., 2017), sehingga metode sambungan las pada baja *cold-formed* ini biasanya digunakan pada proses fabrikasi pabrik (Nadya and Usman, 2018).

4. Sambunga *adhesive*

Sambungan adhesive merupakan sambungan yang menggunakan bahan perekat seperti *epoxy resin* dan *polyester resin* untuk menyatukan elemen CFS. Sambungan *adhesive* ini dapat memberikan kekuatan tambahan pada sambungan sehingga dapat menunda kegagalan yang prematur (Komara dkk., 2017).

Penggunaan dari beberapa jenis sambungan tersebut harus disesuaikan dengan sistem penahan gempa yang digunakan pada struktur baja *cold-formed*. Sistem penahan gempa menurut American Iron & Steel Institute S400 (AISI S400, 2015) terdiri dari 7 sistem yang antara lain : (1) CFS *light-frame shear walls sheathed with wood structural panels* (Gambar 2.1); (2) CFS *light-frame shear walls sheathed with steel sheet sheathing* (Gambar 2.2); (3) CFS *light-frame strap-braced wall systems* (Gambar 2.3); (4) CFS *special bolted moment frames* (Gambar 2.4); (5) CFS *light-frame shear walls with a wood-based structural panel sheathed with wood panels on one side and gypsum panels on the other* (kombinasi dari panel kayu dan panel gipsum); (6) CFS *light-frame shear walls sheathed with gypsum board or fibreboard panel sheathing* (Gambar 2.5); (7) *conventional construction CFS light-frame strap braced wall systems* (Gambar 2.6) (AISI S400, 2015).



Gambar 2.1 CFS *light-frame shear walls sheathed with wood structural panels* (Liu, Peterman and Schafer, 2014)



Gambar 2.2 *CFS light-frame shear walls sheathed with steel sheet sheathing* (Yu, 2010)



Gambar 2.3 *CFS light-frame strap-braced wall systems* (Fiorino dkk., 2016)



Gambar 2.4 *CFS special bolted moment frames* (Kaling dkk., 2015)



Gambar 2.5 *CFS light-frame shear walls sheathed with gypsum board* (Macillo dkk., 2017)



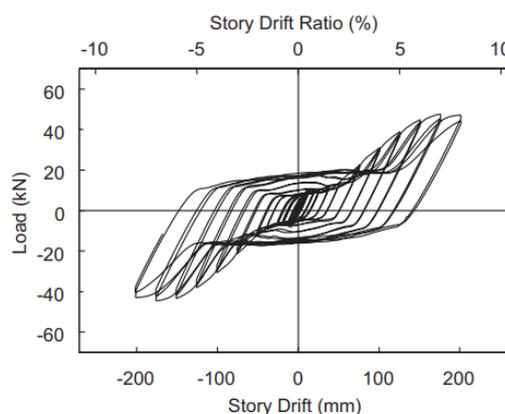
Gambar 2.6 *Conventional construction CFS light-frame strap braced wall systems*
Sumber : (Kasaeian dkk., 2020)

Dari beberapa sistem tersebut CFS *special bolted moment frame* lebih unggul dalam menciptakan denah ruang yang lebih luas dan fleksibel akibat penggunaan elemen CFS yang lebih sedikit, akan tetapi kerentanan elemen terhadap tekuk lokal/distorsional menyebabkan performa sistem ini dalam menghadapi gempa dipertanyakan (Ye dkk., 2019). Karena potensi dalam menciptakan ruang yang lebih luas dan penggunaan elemen-elemen CFS yang lebih sedikit, sistem CFS *special bolted moment frame* dipilih pada studi ini. Akibat kelemahan terhadap tekuk lokal/distorsional diperlukan pengembangan lebih lanjut agar sistem ini dapat

memberikan perilaku yang optimal dibawah pengaruh gempa sehingga dapat diimplementasikan. Pada sistem CFS *special bolted moment frame* sambungan utama adalah sambungan baut, sehingga studi ini akan lebih memfokuskan bahasan pada jenis sambungan tersebut dan dengan pengoptimalan-pengoptimalan yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

2.2. *Cold-formed Steel-Special Bolted Moment Frame (CFS-SBMF)*

Cold-formed steel-special bolted moment frame (CFS-SBMF) merupakan sistem penahan gempa pada struktur baja ringan yang dikembangkan sedemikian rupa sehingga disipasi energi gempa terjadi melalui mekanisme slip dan tumpu (AISI S400, 2015). Balok dan kolom didesain dengan metode desain kapasitas dan direncanakan untuk tetap elastis untuk memastikan perilaku inelastik terjadi pada sambungan (Sato and Uang, 2008). Dalam tes siklik skala penuh *subassemblies* elemen CFS dengan balok tipe *double channel* dan kolom tipe HSS yang dilakukan oleh Uang dkk,2008 didapatkan bahwa semua spesimen SBMF memiliki memiliki daktilitas cukup besar dengan kapasitas *interstory drift* lebih dari 0,04 rad yang merupakan syarat AISC untuk *special moment frame*, histeresis respon salah satu spesimen dalam pengujian tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7. Global respon dari sistem ini terbagi dalam tiga tahap yaitu respon elastis dari SBMF yang berperilaku seperti *rigid join*, kemudian respon slip terjadi saat tahanan slip dari sambungan telah terlampaui, dilanjutkan dengan respon *hardening* yang signifikan akibat pelelehan pada lubang baut hingga terjadi kegagalan (Uang dkk., 2008).

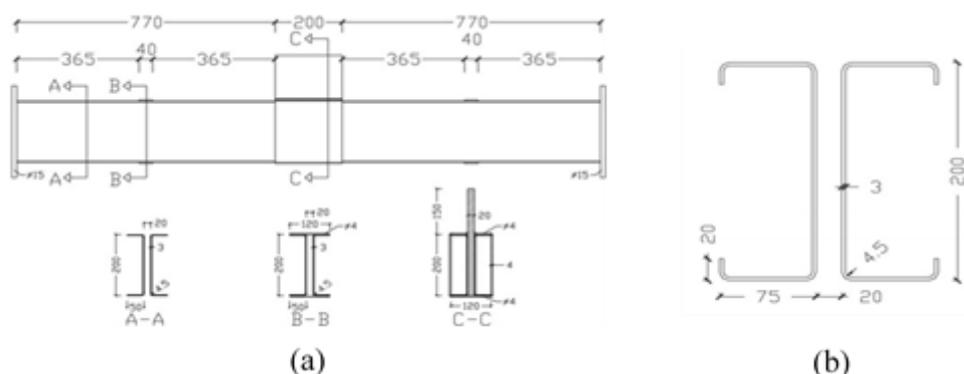


Gambar 2.7 Histeresis respon spesimen SBMF dalam pengujian siklik oleh (Uang dkk., 2008)

Walaupun memiliki daktilitas yang baik, sistem ini dibatasi oleh AISI S400 untuk digunakan hanya pada bangunan satu lantai dengan tinggi lantai tidak lebih dari 10,7 m, dan sistem ini mengharuskan balok menggunakan profil C dan kolom *hollow structural section* (HSS) (AISI S400, 2015). Menurut (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b), sistem sambungan SBMF yang hanya mengandalkan mekanisme slip dan tumpu baut sebagai sumber daktilitas hanya dapat digunakan untuk bangunan satu lantai, sehingga untuk dapat digunakan pada bangunan multi-lantai perlu adanya upaya tambahan untuk mendisipasikan energi gempa melalui pelelehan pada elemen balok.

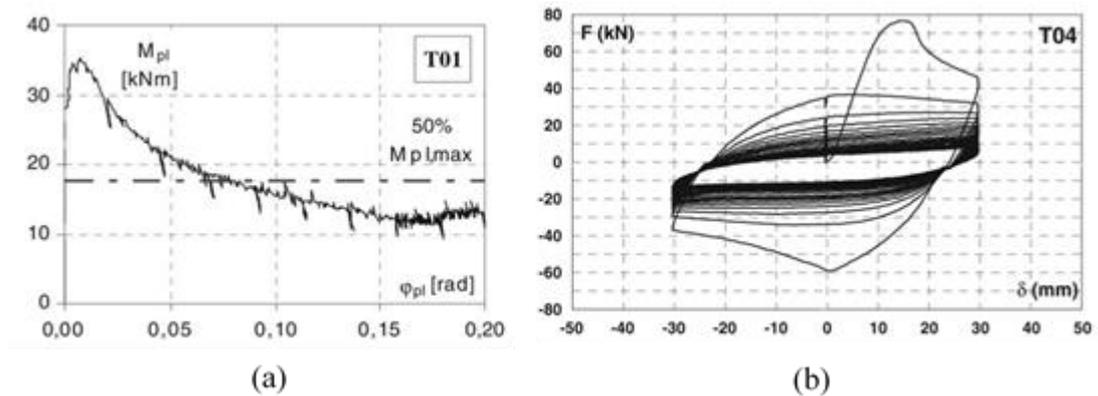
2.3. Pengaruh Jenis Penampang Balok *Cold-formed Steel*

Dikutip dari (Ye dkk., 2020), bahwa terdapat miskonsepsi bahwa elemen struktural CFS tidak daktil, studi sebelumnya menunjukkan dengan menggunakan desain penampang CFS yang tepat dapat menghasilkan daktilitas dan disipasi energi yang cukup baik. Salah satu penelitian yang diacu adalah studi yang dilakukan oleh (Calderoni dkk., 2009), yang meneliti tentang perilaku CFS berpenampang *double back-to-back lipped channel* dibawah pengaruh beban monotonik dan beban siklik, detail salah satu spesimen dan pengujian dapat dilihat pada gambar 2.8.



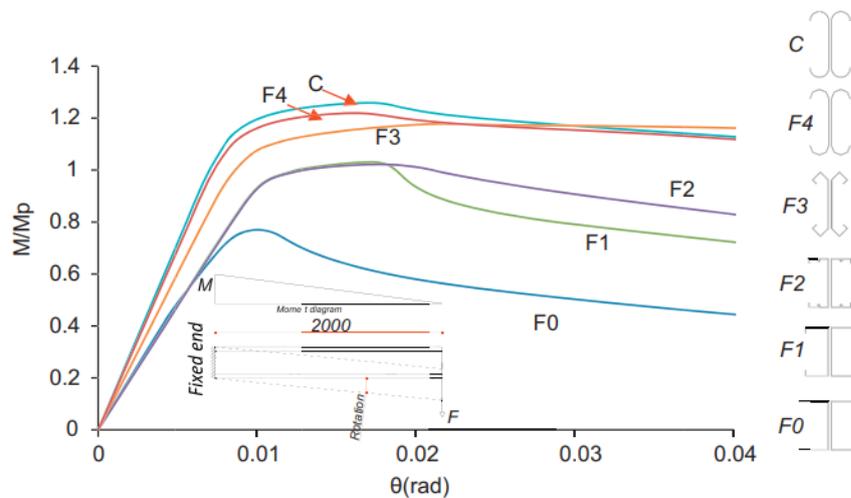
Gambar 2.8 (a) Geometri spesimen, (b) penampang *double back-to-back lipped channel* pada studi balok CFS oleh (Calderoni dkk., 2009)

Dari studi tersebut didapatkan perilaku daktail dan energi disipasi yang tidak dapat diabaikan dan dapat dipertimbangkan sebagai desain CFS non-elastis. Pada pengetesan beban monotonik tercatat kegagalan terjadi saat *plastic rotation* ditengah bentang melebihi 0,1 rad yang dapat dilihat pada gambar 2.9a, sedangkan pada pengetesan siklik energi disipasi berkurang seiring bertambahnya jumlah siklus dan *displacement amplitude*, hasil ini dapat dilihat pada gambar 2.9b.



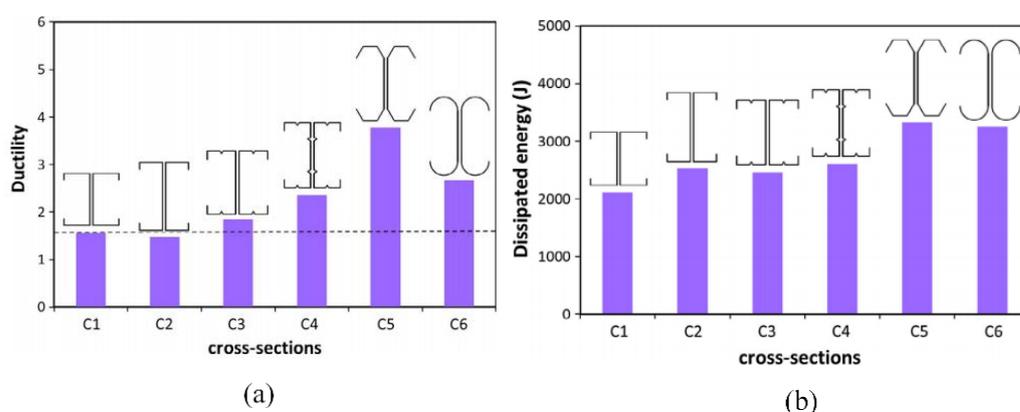
Gambar 2.9 (a) Plastic rotation pada spesimen T01, (b) Kurva histeresi pengetesan siklik spesimen pada studi balok CFS oleh (Calderoni dkk., 2009)

Selain itu studi mengenai rangka pemikul momen pada CFS di universitas Sheffield, UK, oleh (Bagheri Sabbagh dkk, 2012a) menunjukkan bahwa meningkatkan jumlah lipatan hingga melengkungkan *flange* CFS dapat menunda perilaku tekuk pada elemen dan meningkatkan kekuatan dan daktilitas, peningkatan tersebut dapat dilihat pada grafik momen-rotasi pada gambar 2.10.



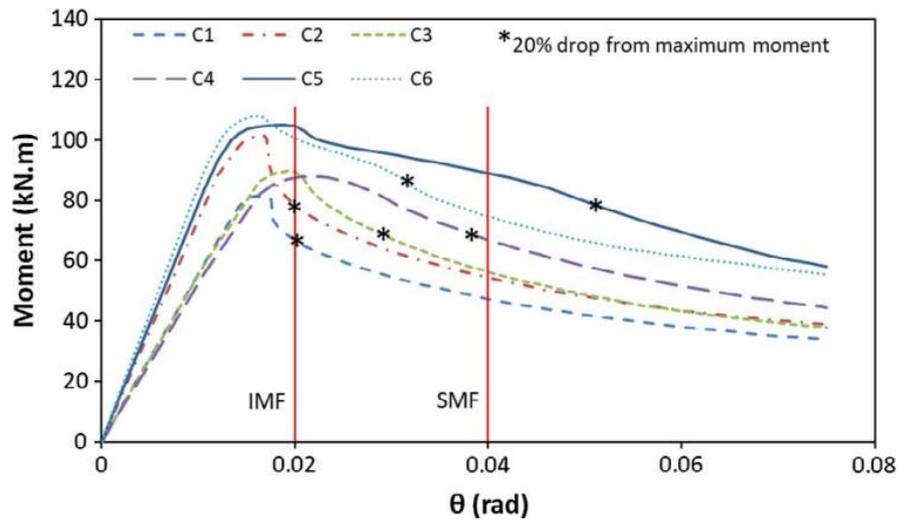
Gambar 2.10 Grafik momen-rotasi pada beberapa spesimen penampang balok CFS (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a)

Studi mengenai perbandingan beberapa penampang CFS dilakukan oleh (Ye dkk., 2016), hasil studi tersebut menunjukkan bahwa CFS dengan penampang *folded-flange section* dapat meningkatkan kapasitas momen hingga 57% (Ye dkk., 2016). Studi yang juga dilakukan oleh (Ye dkk., 2018), tentang penampang CFS yang optimum, menghasilkan kesimpulan bahwa CFS *folded-flange section* mampu mendisipasi energi gempa hingga 60% melalui deformasi plastis yang lebih besar dari penampang CFS komersial, adapun beberapa hasil analisis perbandingan dari beberapa penampang CFS dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Perbandingan daktilitas dan energi disipasi beberapa penampang CFS (Ye dkk., 2018)

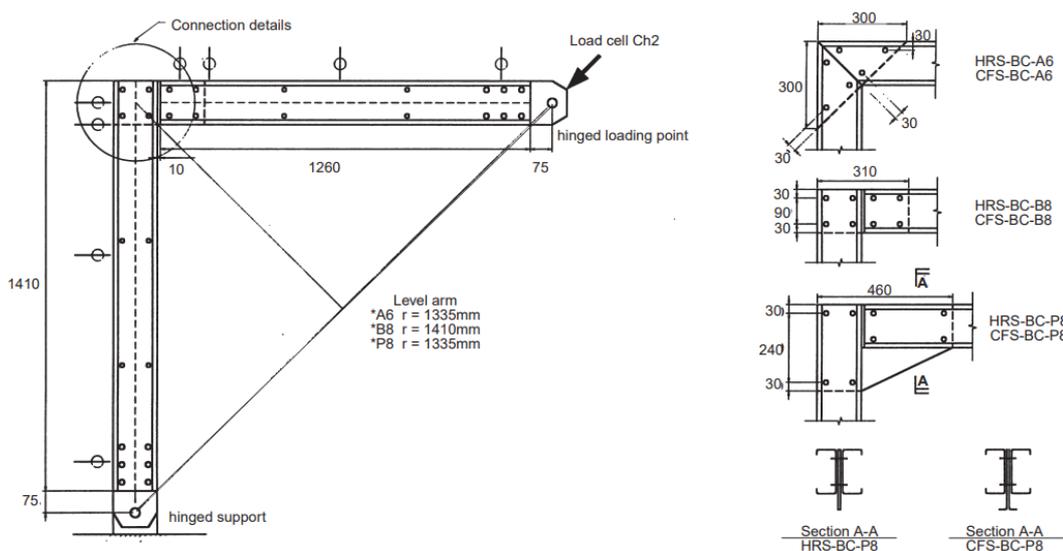
Dalam studi tersebut juga dijelaskan bahwa penampang CFS *folded-flange section* memenuhi kriteria *special moment frame* (SMF) yang mengacu pada AISC, penentuan itu didasarkan pada kapasitas dalam memikul beban paling sedikit 80% dari kapasitas maksimum pada sudut *inter-story drift* 0,02 untuk *intermediate moment frame* (IMF), dan 0,04 untuk *special moment frame* (SMF), perbandingan kurva momen-rotasi pada masing masing spesimen dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Kurva momen-rotasi balok beberapa penampang balok (Ye dkk., 2018)

2.4. Pengaruh Gusset Plate

Studi mengenai perilaku sambungan *bolted moment frame* dengan menggunakan *gusset plate* dilakukan oleh (Chung and Lau, 1999). Spesimen yang digunakan dalam pengujian tersebut yaitu gusset plate dengan material *hot rolled steel* (HRS) dan *cold-formed steel* (CFS) dengan bentuk segitiga (A6), persegi panjang (B8), dan *haunched* (P8), dalam pengujian tersebut terdapat 2 mm jarak pada semua lubang baut, detail spesimen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.14. Hasil eksperimen tersebut secara detail dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.13 Detail spesimen dengan beberapa tipe *gusset plate* (Chung and Lau, 1999)

Tabel 2.1 Rekapitulasi hasil pengujian sambungan dengan beberapa tipe *gusset plate* (Chung and Lau, 1999)

Summary of test specimens and test results of beam column tests

Test	Beam column connection			Mode of failure	Rotational stiffness (kNm/rad)	Rotation capacity (rad)	Measured moment resistance (kNm)	Measured yield strength		Normalised moment resistance (kNm)	Moment resistance ratio
	Gusset plate	Material	No. of specification bolts per member					Member (N/mm ²)	Gusset plate (N/mm ²)		
HRS-BC-A6	Triangular	HRS	3	LTBgp	200	0.090	5.75	459 (CFS)	341 (HRS)	6.30	0.35
CFS-BC-A8	Triangular	CFS	3	LTBgp	200	0.050	3.82	464 (CFS)	454 (CFS)	3.99	0.22
HRS-BC-B8	Rectangular	HRS	4	LTBgp	200	0.090	9.22	462 (CFS)	340 (HRS)	9.22	0.52
CFS-BC-B8	Rectangular	CFS	4	LTBgp	200	0.080	7.12	459 (CFS)	443 (CFS)	7.43	0.42
HRS-BC-P8	Haunched	HRS	4	FFcs	2250	0.018	15.38	471 (CFS)	343 (HRS)	14.69	0.82
CFS-BC-P8	Haunched	CFS	4	FFcs	750	0.008	15.38	465 (CFS)	475 (CFS)	14.88	0.83

Dari hasil analisis tersebut didapatkan bahwa sambungan balok kolom dengan *gusset plate* segitiga (A6) dan persegi panjang (B8) mengalami kegagalan akibat *twisting* dan *lateral bending* pada tahanan momen yang rendah berkisar dari 22% hingga 52% dari kapasitas momen elemen yang disambung. Sedangkan sambungan balok kolom dengan *haunched gusset plate* (P8) mengalami kegagalan dengan mode kegagalan lentur pada nilai momen yang lebih besar dibandingkan dengan tipe *gusset plate* lainnya yaitu lebih dari 80% kapasitas elemen yang disambungkan.

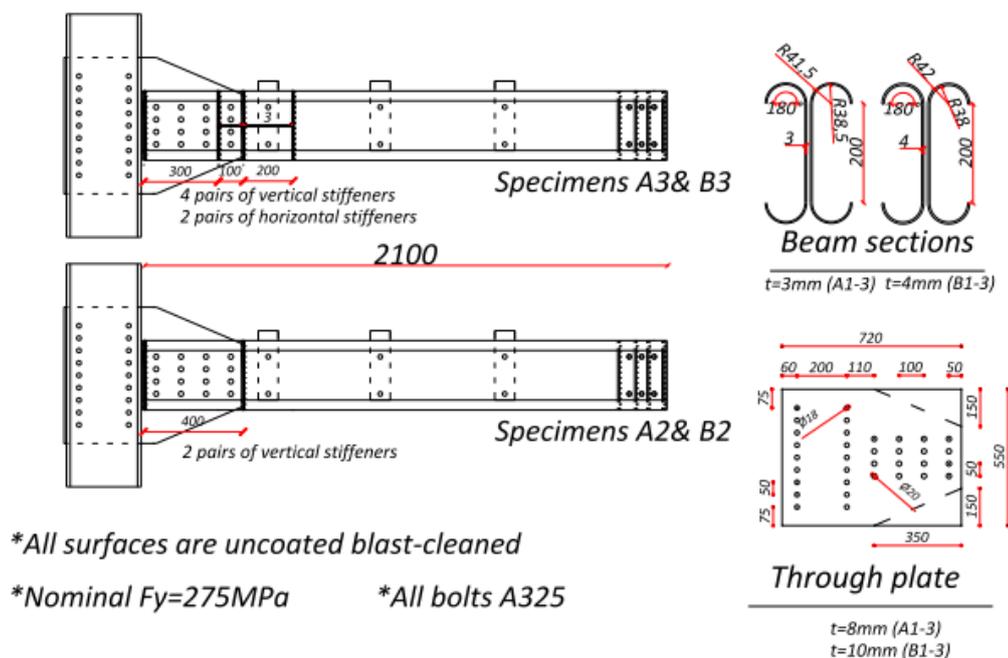
Pengaruh ketebalan *gusset plate* pada sambungan balok kolom *bolted moment frame* diteliti oleh (Ye dkk., 2020). Ketebalan pelat yang diteliti pada studi ini ialah 1,2,4,6 mm untuk *cross section class* 3 dan 4, dan ketebalan 4,6,8,10 mm untuk *cross section class* 1 dan 2. Hasil penelitian tersebut mengungkapkan bahwa dengan ketebalan yang lebih rendah atau sama dengan ketebalan elemen balok CFS menyebabkan tekuk lokal pada balok berpindah ke elemen *gusset plate*, tipe kegagalan prematur ini dapat menyebabkan degradasi kapasitas momen yang signifikan dan meningkatkan degradasi kekuatan *post-buckling* dari sambungan. Mode kegagalan yang tidak diinginkan ini dapat dicegah dengan mempertebal elemen *gusset plate* sedikit lebih besar dari ketebalan elemen balok CFS.

2.5. Pengaruh *Stiffner* pada Elemen Balok

Studi eksperimental pengaruh *stiffner* pada elemen balok dilakukan oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b). Variasi *stiffner* yang digunakan antara lain tanpa *stiffner*, minimum *stiffner*, dan *full stiffner*, detail dari spesimen yang tersebut dapat dilihat pada tabel 2.2 dan konfigurasi spesimen pada gambar 2.15.

Tabel 2.2 Parameter *stiffner* pada studi experimental oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a)

Specimens	Beam thickness (mm)	Connection stiffeners	Connection type
A1	3	No stiffeners	Slip-critical
A2	3	Partial (minimum) stiffeners	Slip-critical
A3	3	Full (optimum) stiffeners	Slip-critical
B1	4	No stiffeners	Slip-critical
B2	4	Partial (minimum) stiffeners	Slip-critical
B3	4	Full (optimum) stiffeners	Slip-critical



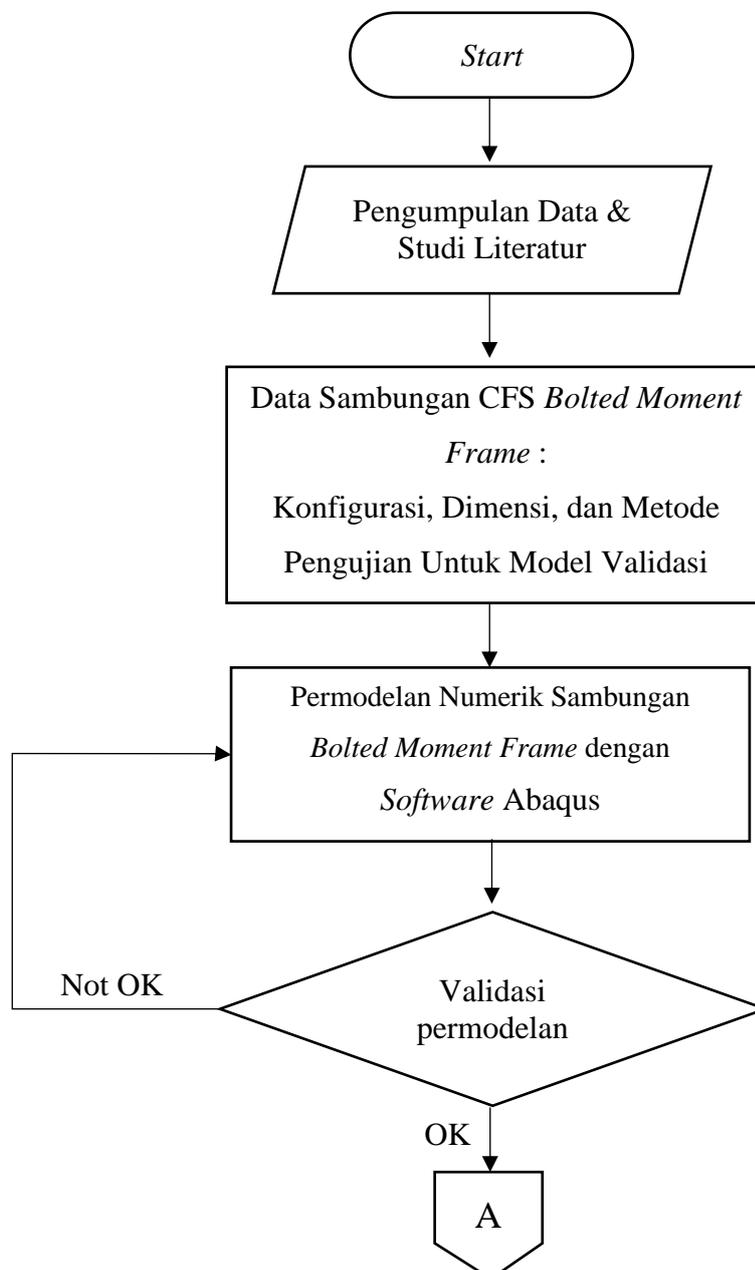
Gambar 2.14 Konfigurasi *stiffner* pada spesimen studi eksperimental (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a)

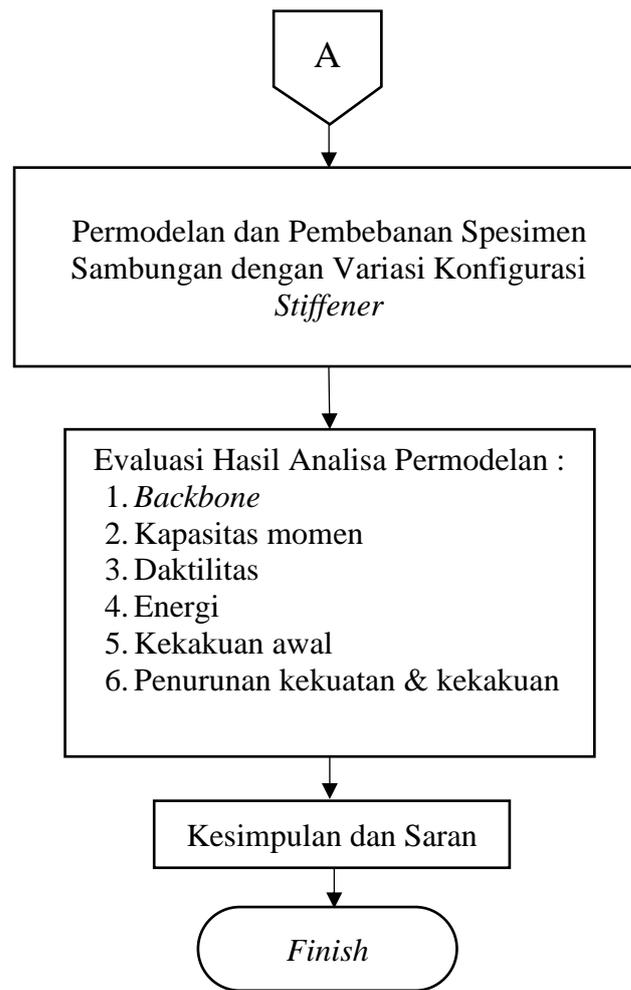
Dari hasil eksperimen tersebut didapatkan bahwa penggunaan *stiffner* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan daktilitas. Didapatkan peningkatan pada spesimen A2 dan A3 adalah masing-masing 50% dan 75%, untuk spesimen B2 dan B3 masing-masing adalah 28% dan 43%. Selain itu penggunaan *stiffner* juga mempengaruhi peningkatan kapasitas momen pada spesimen tersebut tercatat peningkatan momen terjadi pada spesimen A2 dan A3 masing-masing sebesar 29% dan 35% terhadap spesimen A1, sedangkan pada spesimen B2 dan B3 meningkat sebesar 10% dan 23% terhadap spesimen B1. Hal ini dikarenakan *stiffner* memperkaku baik dari *flange* dan *web* penampang sehingga meningkatkan ketahanan tekuk dari elemen. Penggunaan *stiffner* juga meningkatkan energi histeresis dari sambungan. Pada spesimen A2 energi histeresis meningkat hingga 30% dan sambungan mampu mencapai rotasi yang lebih besar, pada spesimen A3 energi histeresis meningkat hingga 90% terhadap spesimen A1. Dengan meningkatkan ketebalan penampang balok pada spesimen B1 energi histeresis meningkat hingga 122% terhadap spesimen A1. Sedangkan dengan menambahkan *stiffner* pada spesimen B2 dan B3 didapatkan peningkatan energi histeresis yang lebih besar yaitu 73% lebih besar dari spesimen B1 (Bagheri Sabbagh dkk., 2012a).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir

Metode analisis yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku beberapa sambungan yang diusulkan adalah metode numerik. Metode numerik diharapkan dapat mensimulasikan perilaku dari sambungan dengan baik. Metode numerik yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *finite element* dengan menggunakan *software* Abaqus. Tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1





Gambar 3.1 Flowchart metodologi penelitian

3.2. Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Pada tahapan studi literatur ini akan dipelajari beberapa jurnal penelitian terkait sambungan balok-kolom baja *cold-formed* dan beberapa aturan terkait. Beberapa peraturan yang akan digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, yaitu :

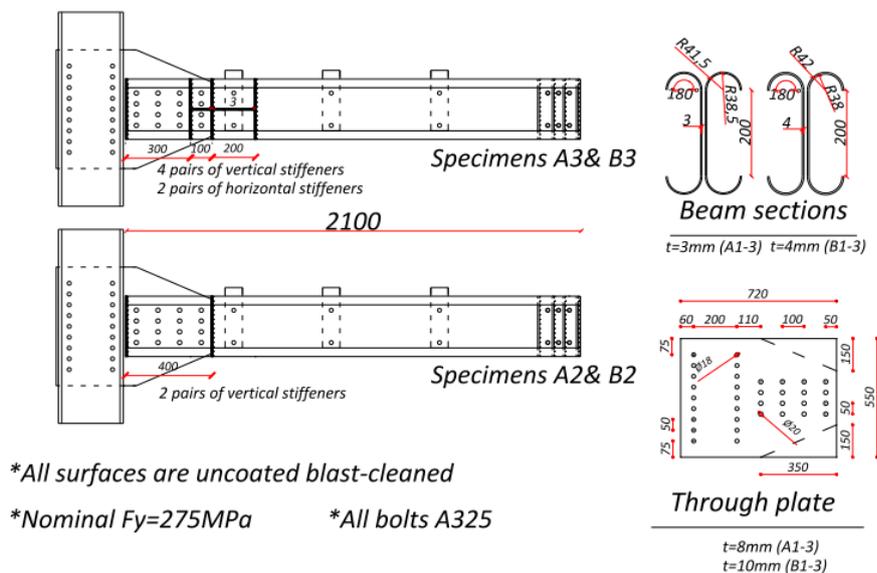
1. *American Iron and Steel Institute S-100 2016 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*
2. *American Iron and Steel Institute S-400 2015 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Systems*
3. *ANSI/AISC 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*

3.3. Validasi Numerik Sambungan *CFS Bolted Moment Frame*

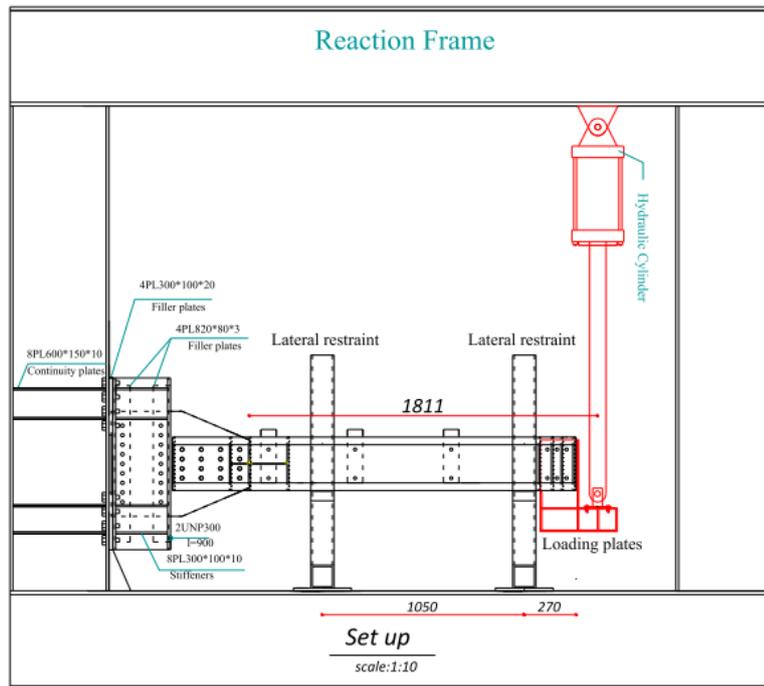
Tahapan permodelan sambungan *bolted moment frame* untuk validasi program numerik dilakukan dengan memodelkan sambungan balok kantilever dengan kolom, menggunakan program bantu Abaqus. Model ini merujuk pada penelitian eksperimental yang dilakukan (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b). Pada penelitian tersebut terdapat beberapa spesimen yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dengan detail konfigurasi dan dimensi dapat dilihat pada Gambar 3.2, sedangkan skema pengetasan dapat dilihat pada Gambar 3.3. Spesimen yang akan digunakan sebagai validasi pada studi ini adalah spesimen A1.

Tabel 3.1 Spesimen uji pada penelitian (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)

Specimens	Beam thickness (mm)	Connection stiffeners	Connection type
A1	3	No stiffeners	Slip-critical
A2	3	Partial (minimum) stiffeners	Slip-critical
A3	3	Full (optimum) stiffeners	Slip-critical
B1	4	No stiffeners	Slip-critical
B2	4	Partial (minimum) stiffeners	Slip-critical
B3	4	Full (optimum) stiffeners	Slip-critical



Gambar 3.2 Dimensi dan konfigurasi spesimen uji (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)



Gambar 3.3 Skema pengetesan pada sambungan (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)

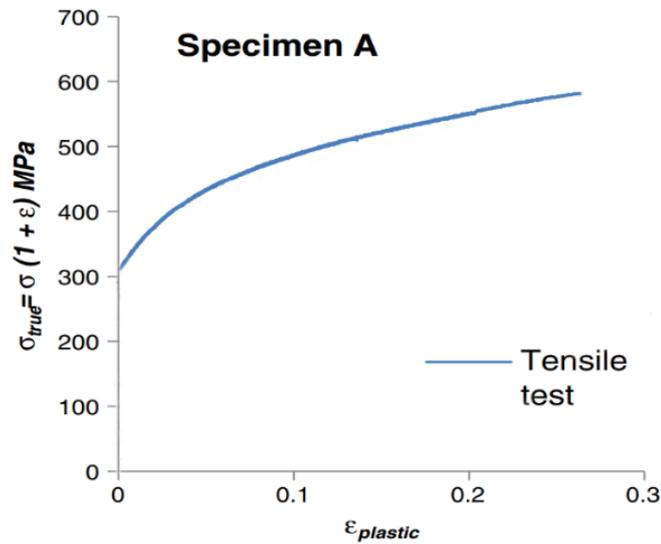
Permodelan ini perlu dilakukan untuk mengetahui apakah input material yang digunakan, interaksi antar elemen, *boundary condition*, dan hasil permodelan desain menunjukkan hasil yang sama dengan pengujian eksperimental, sehingga permodelan tervalidasi.

a. Permodelan geometri sambungan spesimen A1

Semua elemen dan konfigurasi pada spesimen A1 akan dimodelkan pada program Abaqus.

b. *Material properties*

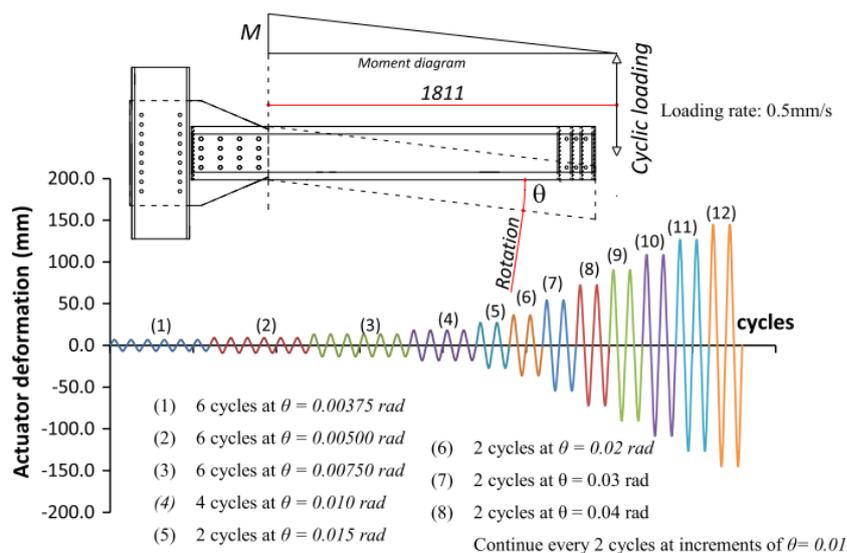
Material yang digunakan dalam pengujian eksperimental oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b) untuk elemen balok, kolom, dan *gusset plate* digunakan baja mutu S275, sedangkan untuk baut digunakan baut A325 M18 pada sambungan kolom-pelat dan A325 M20 pada sambungan balok-pelat. *Elastic modulus* baja yang digunakan sebesar 210 GPa dan *poisson ratio* 0,3. Kurva *stress-strain* dari balok dan *gusset plate* CFS diambil berdasarkan hasil uji tarik oleh (Bagheri Sabbagh dkk., 2013) dapat dilihat pada Gambar 3.4. Dalam studi ini tidak digunakan konstitutif model apapun, hanya menggunakan hasil uji tarik sesuai jurnal yang diacu.



Gambar 3.4 Kurva *plastic stress-strain* balok dan *gusset plate* (Bagheri Sabbagh dkk., 2012)

c. Pembebanan pada model validasi

Berdasarkan studi eksperimental (Bagheri Sabbagh dkk., 2012) pembebanan yang diberikan pada spesimen acuan adalah beban siklik dengan menggunakan protokol pembebanan sesuai dengan S6.2 (ANSI/AISC 341-05, 2005) untuk mengkuifikasi apakah sambungan balok-kolom termasuk *intermediet* atau *special moment frame*. Pembebanan siklik tersebut diberikan diujung balok. Pembebanan siklik yang digunakan pada eksperimen tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.5.

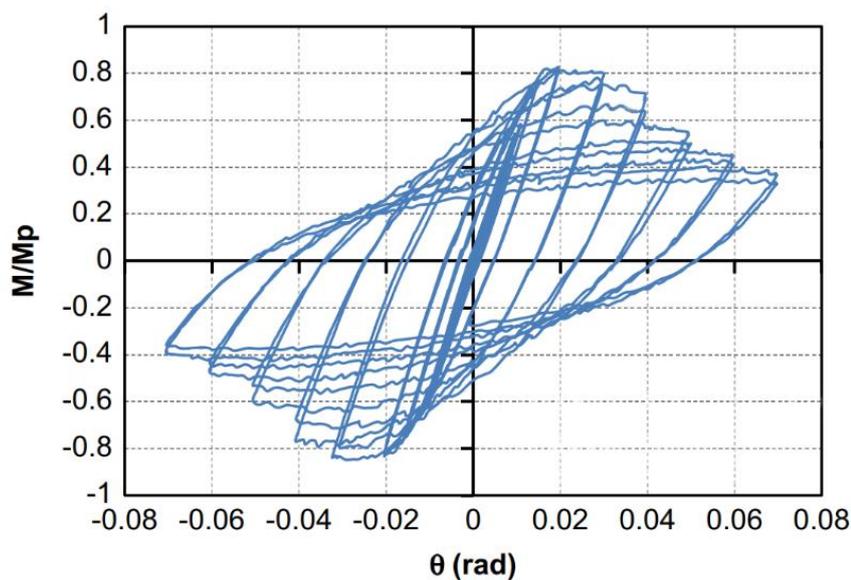


Gambar 3.5 Pembebanan siklik (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)

d. Meshing

Meshing pada model validasi sambungan balok-kolom *bolted moment frame* menggunakan *meshing* dengan tipe elemen S8R (*8-node quadrilateral shell element with reduced integration*) yang terdapat di *library* Abaqus yang merupakan elemen hexahedral yang memiliki 6 node dimana setiap nodenya memiliki 6 derajat kebebasan translasi dan rotasi. Ukuran *mesh* yang digunakan pada setiap elemen adalah 20 mm x 20 mm. Sedangkan elemen baut dimodelkan sebagai *point based fastener* yang tersedia pada *library* ABAQUS.

Hasil permodelan tersebut kemudian dicek dengan hasil eksperimental (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b) dan dapat dikatakan akurat apabila hasil permodelan mendekati hasil eksperimental pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Momen kurvaturnya model validasi (Bagheri Sabbagh dkk., 2012b)

3.4. Permodelan Spesimen Sambungan Balok-Kolom *Cold-formed*

Setelah validasi berhasil, langkah selanjutnya yaitu melakukan permodelan beberapa spesimen dengan parameter yang akan diinvestigasi. Parameter yang digunakan pada spesimen adalah konfigurasi *stiffener* pada sambungan balok-kolom. Pada studi ini terdapat 8 spesimen sambungan dengan konfigurasi *stiffener* yang berbeda-beda. Proses penentuan letak *stiffener* dilakukan berdasarkan pola kerusakan yang terjadi pada sambungan. Hal ini dilakukan dengan

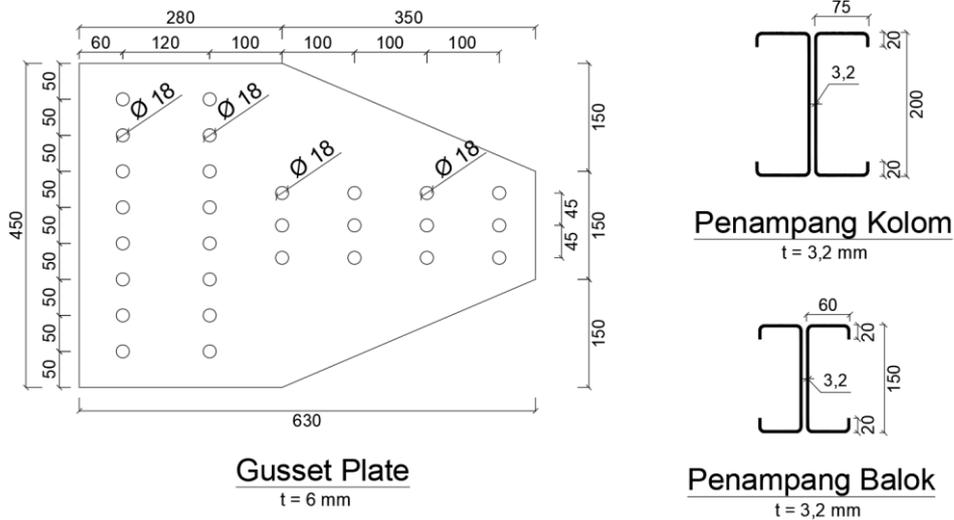
melakukan *running* spesimen *benchmark* (S1) pada *abaqus*, pada hasil *running* tersebut dilihat bagaimana pola kerusakan dari sambungan, area sambungan yang mengalami kerusakan kemudian akan dipasang *stiffener*. Spesimen yang sudah diberi *stiffener* kemudian dirunning lagi hingga diketahui pola kerusakan dan kemudian berdasarkan area kerusakan tersebut akan ditentukan dimana *stiffener* akan diletakkan. Proses tersebut dilakukan hingga diperoleh 7 spesimen yang akan dijadikan objek penelitian pada studi ini. Secara ringkas spesimen yang digunakan pada studi ini dapat dilihat pada Tabel 3.2, sedangkan untuk material elemen sesuai Tabel 3.3. Profil balok yang digunakan pada spesimen ini adalah *double back-to-back lipped channel* 150x65x20 dengan ketebalan 3,2 mm, sedangkan untuk kolom digunakan profil *double back-to-back lipped channel* 200x75x20 dengan tebal 3,2 mm. Pada elemen *gusset plate* digunakan pelat baja *cold-formed* dengan ketebalan 6 mm. Pada elemen *stiffener* digunakan pelat baja *cold-formed* dengan ketebalan 3,2 mm. Material yang digunakan untuk elemen kolom, balok, *gusset plate*, dan *stiffener* adalah *stress-strain curve* pada Gambar 3.4. Untuk baut, material tidak diinputkan karena baut dimodelkan sebagai *point-based fastener* dengan perilaku *rigid* di *Abaqus*. Detail penampang kolom, balok dan *gusset plate* dapat dilihat pada Gambar 3.7. Sedangkan untuk detail dari spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.8 hingga Gambar 3.15.

Tabel 3.2 Spesimen sambungan balok-kolom CFS *bolted moment frame*

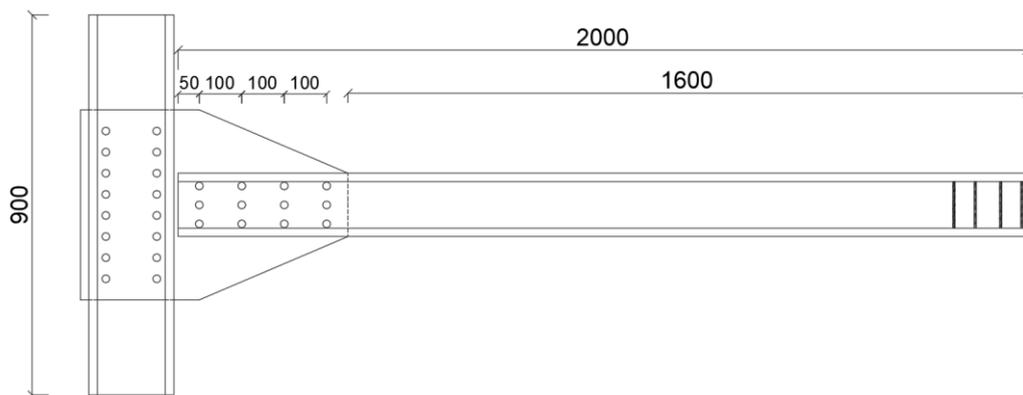
Nama Spesimen	Tipe Kolom	Tipe Balok	Ketebalan <i>Gusset Plate</i> (mm)	Keterangan <i>Stiffener</i>
S1	<i>Double Back-to-Back Lipped Channel</i> 200x75x20 t = 3,2 mm	<i>Double Back-to-Back Lipped Channel</i> 150x65x20 t = 3,2 mm	6	Tanpa <i>stiffener</i>
S2				2 vertikal <i>stiffener</i>
S3				3 vertikal <i>stiffener</i>
S4				3 vertikal + 1 horizontal <i>stiffener</i>
S5				4 vertikal <i>stiffener</i>
S6				5 vertikal <i>stiffener</i>
S7				6 vertikal <i>stiffener</i>
S8				3 vertikal + 2 diagonal <i>stiffener</i> (X <i>stiffener</i>)

Tabel 3.3 Material yang digunakan pada spesimen

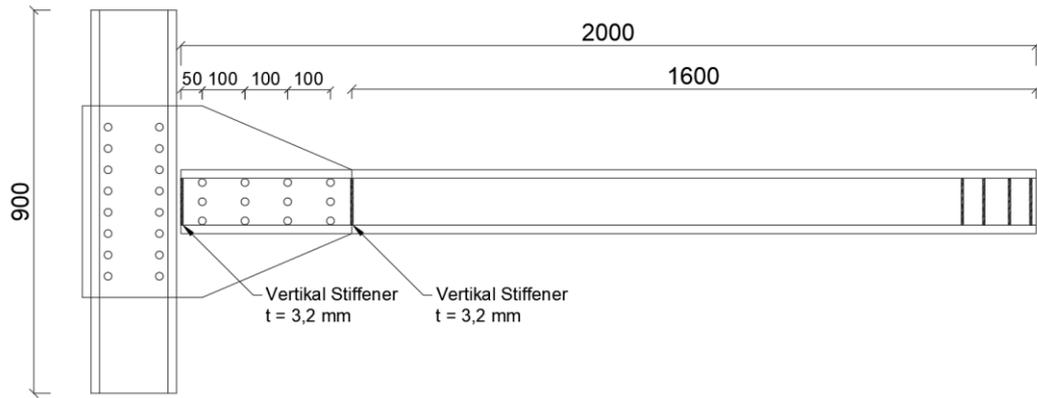
Elemen	Properti Material				
	Modulus Elastistas (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength, F_y (MPa)	Ultimate Strength, F_u (MPa)	Ultimate elongation, ϵ_u (%)
Balok	210000	0,3	310	583	26,2
Kolom	210000	0,3	310	583	26,2
Gusset plate	210000	0,3	310	583	26,2
Stiffener	210000	0,3	310	583	26,2



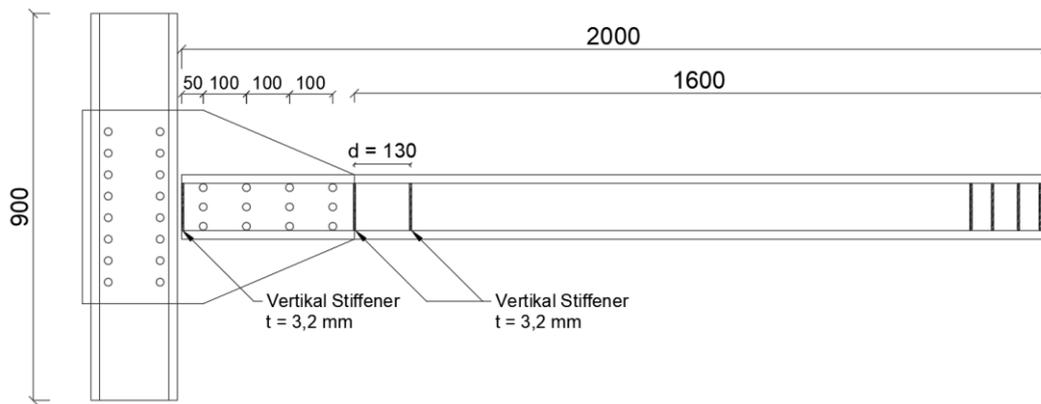
Gambar 3.7 Detail gusset plate, penampang kolom dan balok spesimen



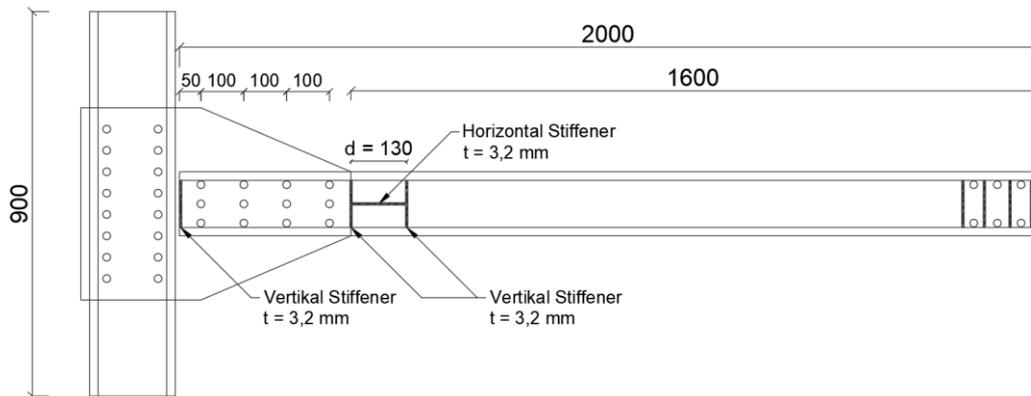
Gambar 3.8 Spesimen S1



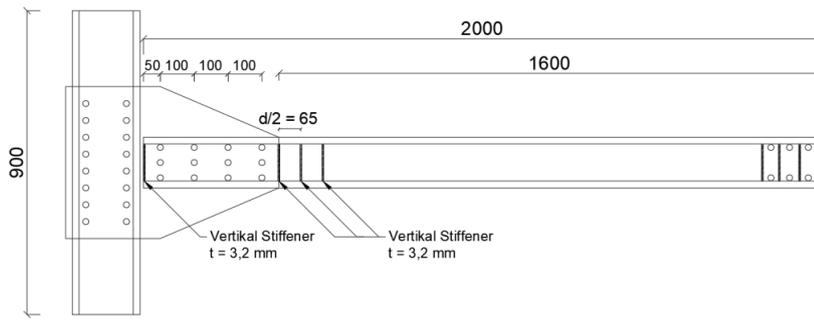
Gambar 3.9 Spesimen S2



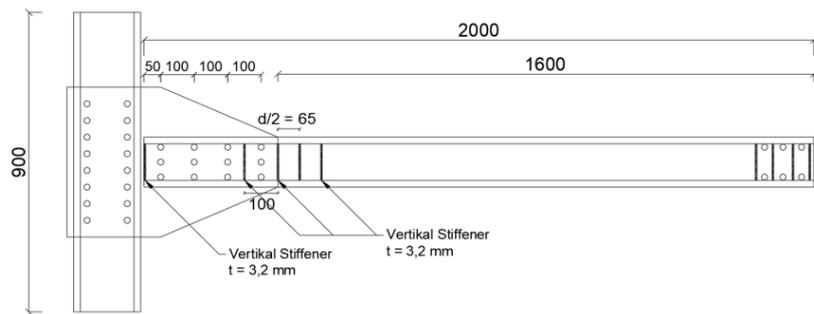
Gambar 3.10 Spesimen S3



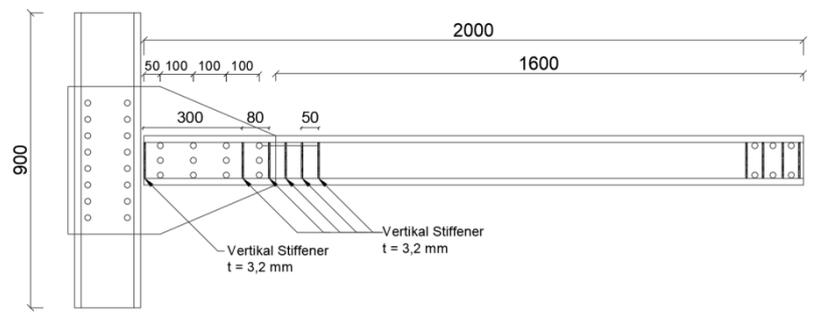
Gambar 3.11 Spesimen S4



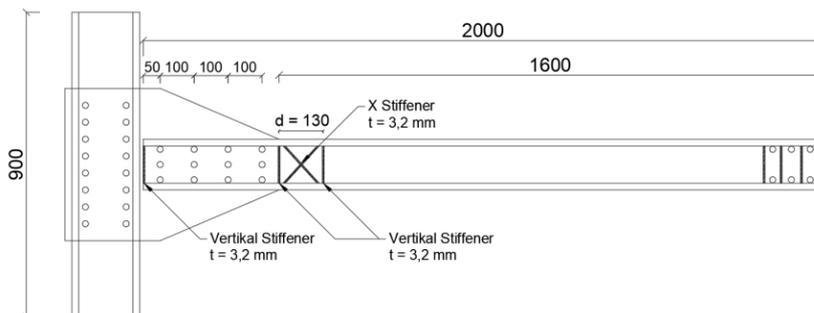
Gambar 3.12 Spesimen S5



Gambar 3.13 Spesimen S6



Gambar 3.14 Spesimen S7



Gambar 3.15 Spesimen S8

3.5. Prosedur Permodelan dengan Menggunakan Program Bantu Abaqus

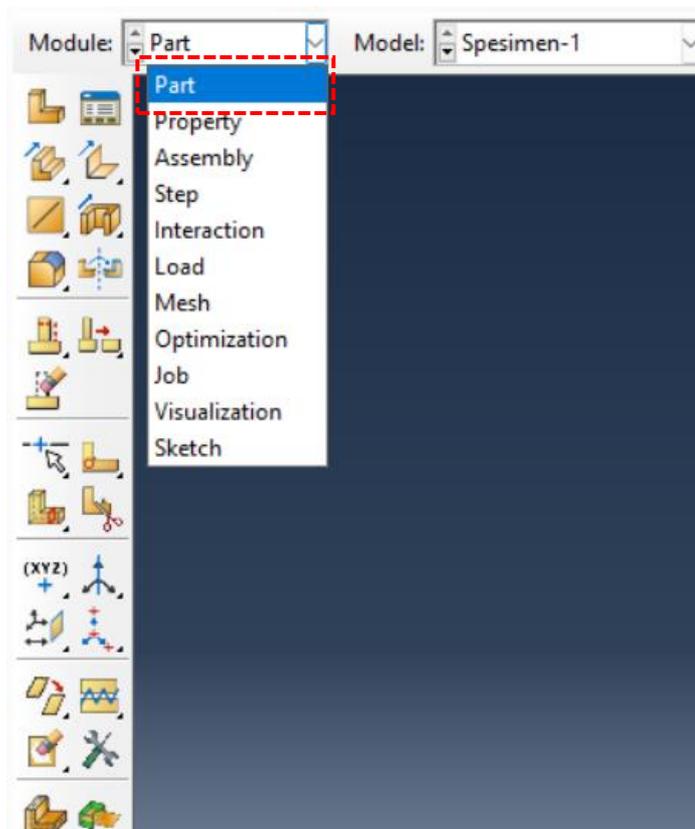
Permodelan sambungan *sub-assembly* balok-kolom dilakukan dengan menggunakan program bantu Abaqus dengan tahapan sebagai berikut:

A. Tahap *pre-processing*

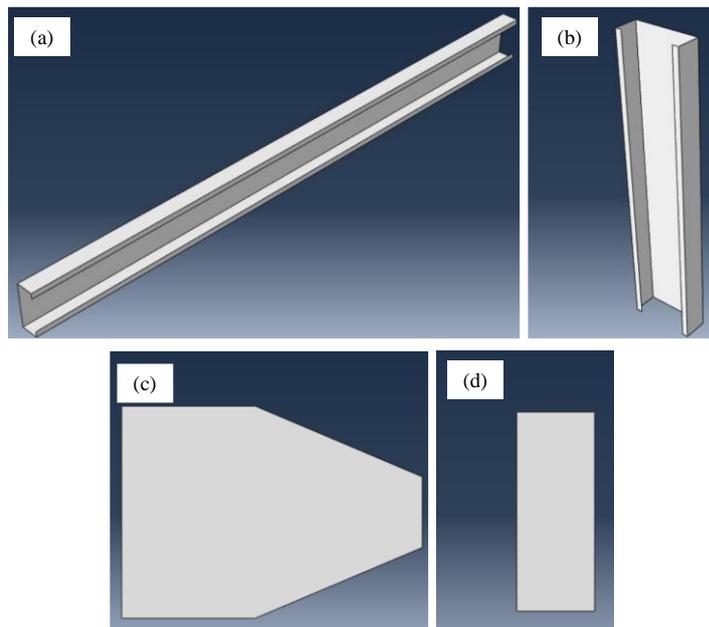
Tahap *pre-processing* adalah tahap permodelan sambungan seperti permodelan elemen struktur, material, beban.

1. Memodelkan tiap elemen sambungan pada *Part*

Permodelan dimulai dengan mendefinisikan geometri dari elemen yang menyusun sambungan seperti balok, kolom, *gusset plate*, dan *stiffener*. Permodelan elemen-elemen tersebut dilakukan pada menu *part* yang dapat dilihat pada Gambar 3.16. Adapun permodelan dari tiap elemen dapat dilihat pada Gambar 3.17. Elemen dari sambungan baja *cold-formed* dimodelkan 3D sebagai *shell element*.



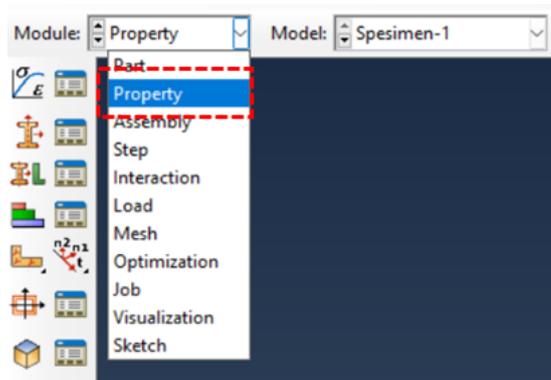
Gambar 3.16 Menu *part* Abaqus



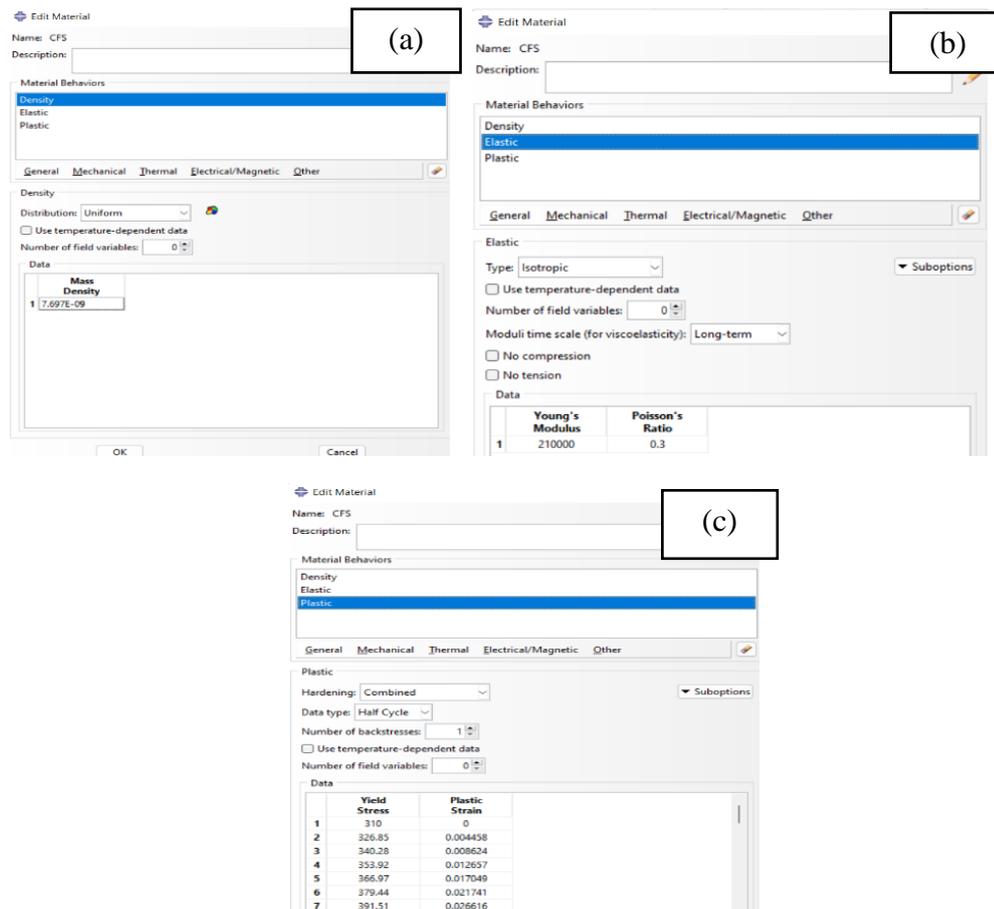
Gambar 3.17 Permodelan elemen sambungan (a) Balok, (b) kolom, (c) *gusset plate*, (d) *stiffener balok*

2. Mendefinisikan material sambungan

Setelah tiap elemen sudah dimodelkan dalam part, langkah selanjutnya adalah mendefinisikan properti material dari sambungan dimenu *property* seperti pada Gambar 3.18. Perilaku material yang diinput adalah berat jenis, elastis, dan plastis. Mutu baja yang digunakan pada tiap elemen sambungan adalah S275 MPa dengan massa jenis 7850 kg/m, modulus elastisitas 210 GPa, *poisson ratio* 0,3. Pada *plastic behaviour* diinput properti plastis material berupa tegangan-regangan plastis sesuai gambar 3.4. Selain itu *combined hardening* dengan *data type half cycle* dipilih sebagai tipe *strain hardening* yang digunakan. Input properti dapat dilihat pada Gambar 3.19.



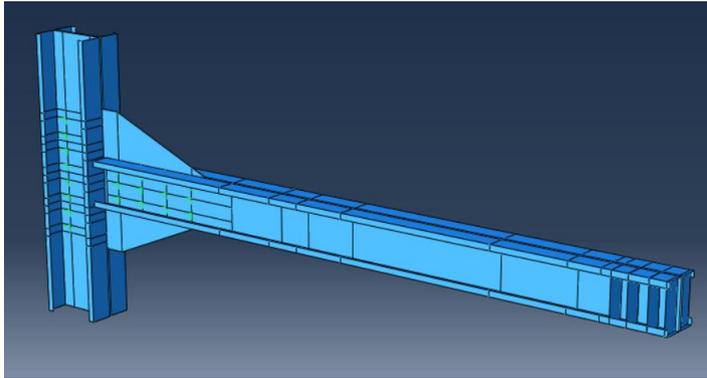
Gambar 3.18 Menu *property* Abaqus



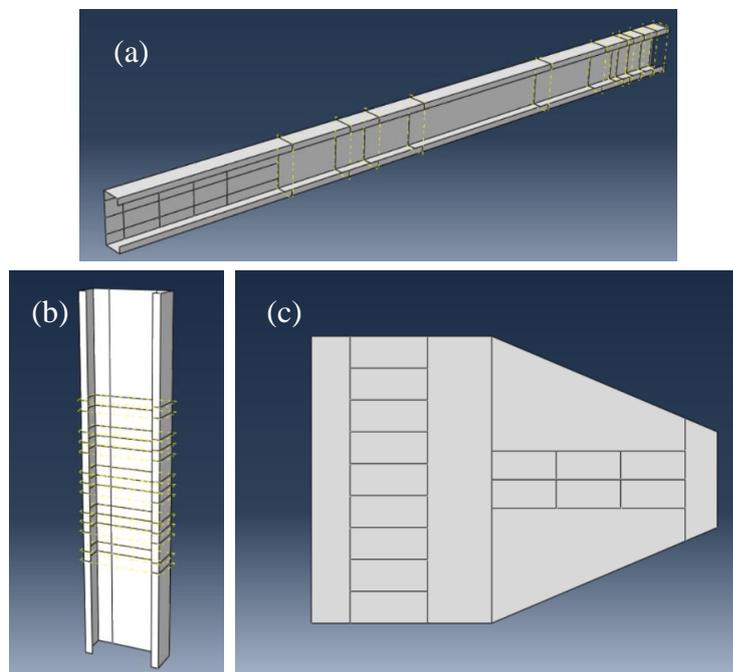
Gambar 3.19 Input material behaviour (a) density, (b) elastic behaviour, (c) plastic behaviour

3. Melakukan *assembly* tiap elemennya

Elemen yang telah dimodelkan dirangkai menjadi satu kesatuan pada menu *assembly* Abaqus. Elemen dirangkai sedemikian rupa sehingga sesuai dengan konfigurasi dari spesimen yang direncanakan. Adapun *assembly* dari sambungan dapat dilihat pada gambar 3.20. Sebelum *diassembly* tiap elemen yang memerlukan partisi harus dipartisi untuk mempermudah dalam meletakkan tiap elemen pada tempat yang direncanakan. Seperti contohnya untuk meletakkan *stiffener* balok maka balok perlu dipartisi pada lokasi yang akan dipasang *stiffener*. Selain itu dengan adanya partisi akan memudahkan dalam memodelkan *boundary condition* dan *constraint* yang akan digunakan. Partisi yang digunakan pada elemen sambungan dapat dilihat pada Gambar 3.21.



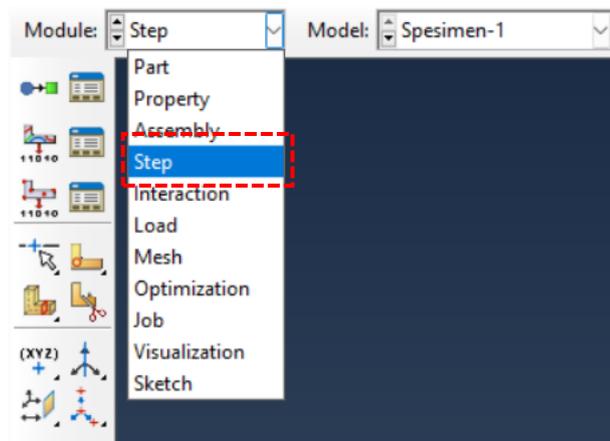
Gambar 3.20 *Assembly* elemen-elemen sambungan



Gambar 3.21 Partisi pada elemen sambungan (a) Partisi balok, (b) partisi pada kolom, (c) partisi pada *gusset plate*

4. Mendefinisikan *step*

Pada tahap ini terdapat 2 *step* yang digunakan yaitu *initial* dan *loading step*. *Step* dapat didefinisikan pada menu *step* diAbaqus seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.22. 2 *step* yang didefinisikan dapat dilihat pada Gambar 3.23. Pada tahap *step* juga inkrementasi dari analisis didefinisikan. Pada *step loading*, *nlgeom* di aktifkan untuk analisis non-linear. Input *time period* sesuai dengan lama durasi pembebanan, pada analisis ini durasi pembebanan yaitu 69,46 detik.



Gambar 3.22 Menu step Abaqus

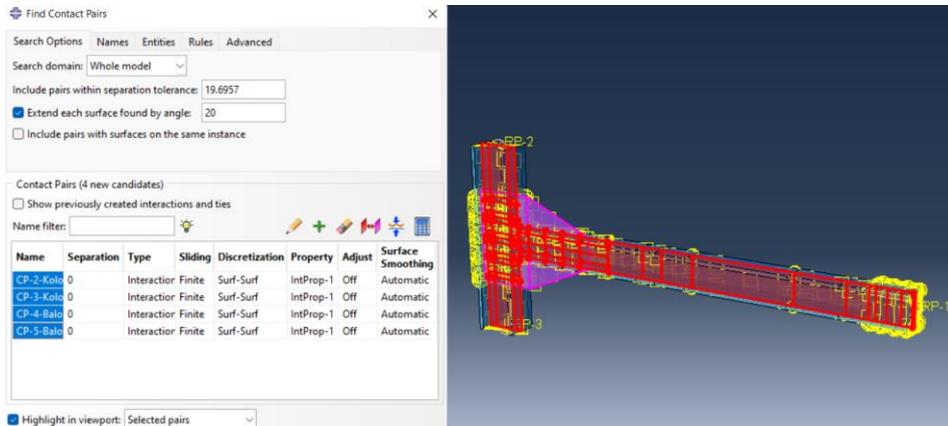
Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓ Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓ Loading	Static, General	ON	69.4696

Gambar 3.23 Pendefinisian step

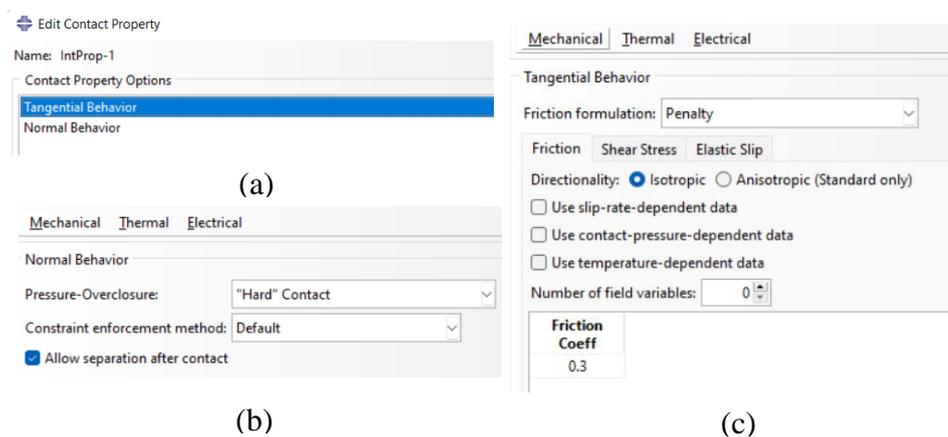
5. Mendefinisikan *interaction* antar elemen

Interaksi antara elemen yang terhubung satu sama lain perlu didefinisikan dalam menu *interaction* pada Abaqus. Kontak antara elemen kolom-*gusset plate* dan kontak antara elemen balok-*gusset plate* didefinisikan dengan menggunakan fitur “*find contact pair*” yang dapat dilihat pada Gambar 3.24. Kemudian mendefinisikan properti kontak yaitu “*tangential behaviour*” dan “*normal behaviour*”. Pada *tangential behavior* dipilih “*penalty*” sebagai *friction formulation* dengan koefisien friksi sebesar 0,3. Sedangkan untuk *nomal behavior* dipilih *hard contact*. Pendefinisian properti kontak tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.25. Selain itu *constraint* perlu didefinisikan. kedua balok dihubungkan dengan pelat pengisi yang mengisi celah antara balok, dimana pelat pengisi ini dihubungkan dengan dibaut, di Abaqus pelat ini dimodelkan dengan “*Tie*” *constraint*, sehingga kedua permukaan balok dapat terhubung dan terikat bersama di arah U_x , U_y , U_z . Kemudian stiffener dihubungkan terhadap permukaan balok dan kolom dengan menggunakan “*Tie*” *constraint*. Pada bagian atas dan dasar kolom penampang diberi constraint “*coupling*”. Pada ujung balok penampang balok kiri dan kanan dikopelkan dengan *coupling constraint* agar kedua penampang balok dapat

bergerak secara bersamaan saat pembebanan berlangsung. Permodelan *constraint* tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.26.



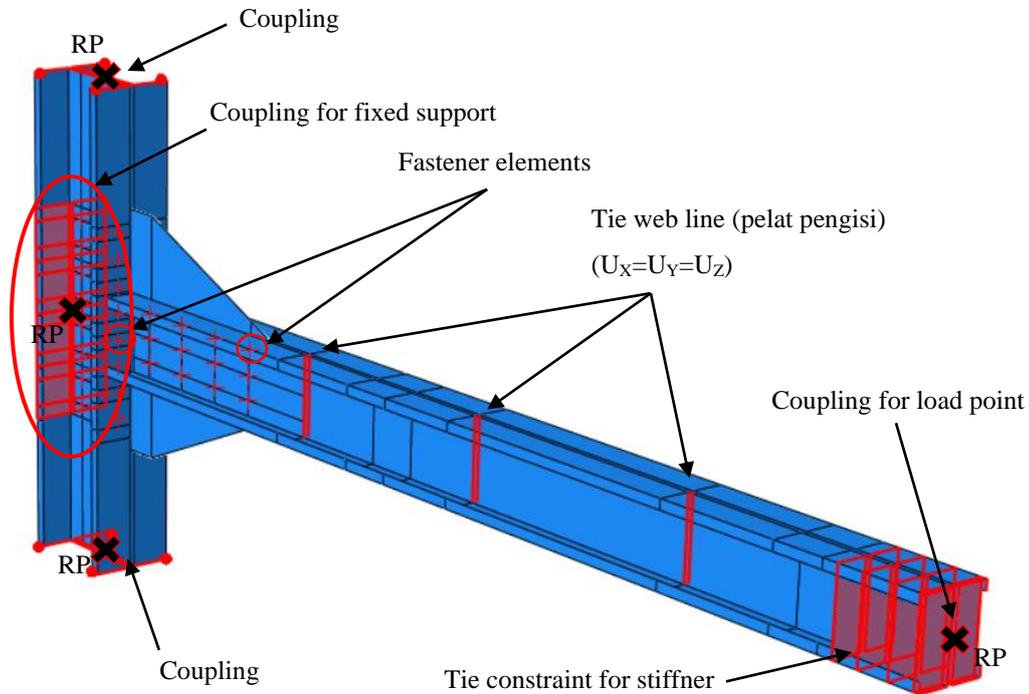
Gambar 3.24 Fitur *find contact pair*



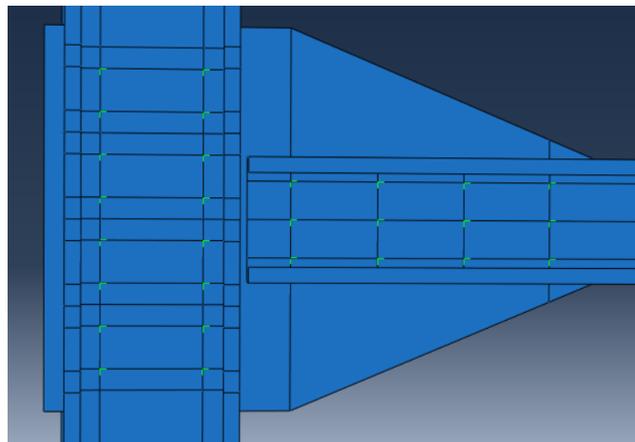
Gambar 3.25 *Contact property* (a) *contact property options*, (b) *normal behavior*, (c) *tangential behavior*

Pada *interaction modul* juga dilakukan permodelan baut. Pada studi ini tiap baut dimodelkan dengan *point-based fastener* yang terdapat di *library* Abaqus. Konfigurasi yang digunakan adalah dua lapis *fastener* yang tiap layernya menghubungkan antara balok ke *gusset plate* atau kolom ke *gusset plate*. Tiap *node* balok atau kolom terhubung dengan pelat CFS dengan *connector element* yang mengkopel perpindahan dan rotasi pada daerah baut. Untuk memodelkan baut dengan *point-based fastener*, jari-jari baut perlu didefinisikan pada “*physical radius*” yang akan merepresentasikan jari-jari baut dan untuk mensimulasi interaksi antara baut dan permukaan lubang baut. Pada studi ini dipilih perilaku baut yang

rigid yang akan di *assign* ke tiap baut. Permodelan *point based fastener* dapat dilihat pada Gambar 3.27.



Gambar 3.26. *Constraint sambungan*

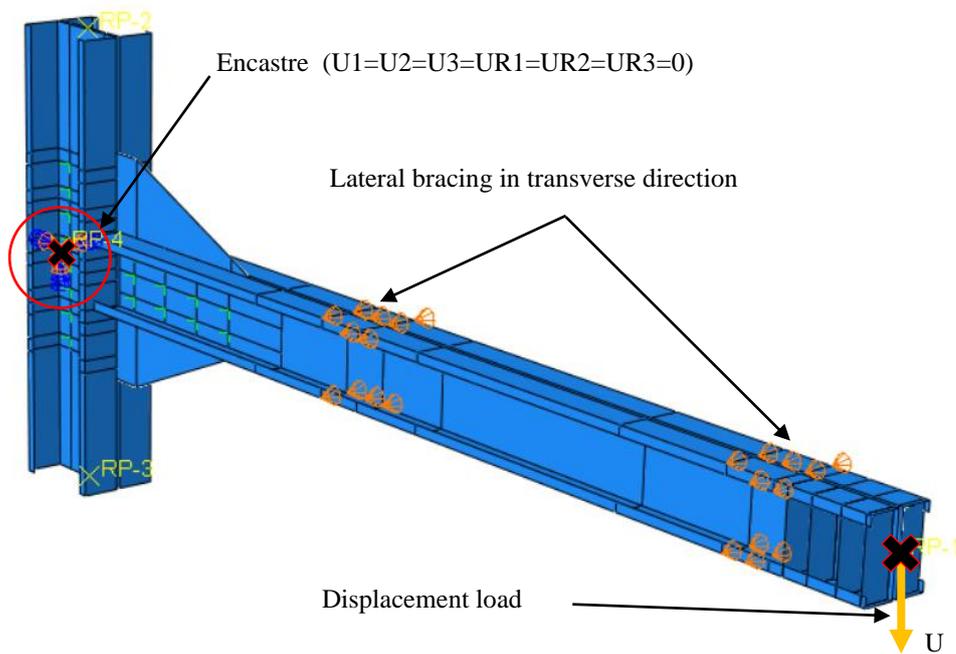


Gambar 3.27 Permodelan baut dengan menggunakan fitur *point based fastener*

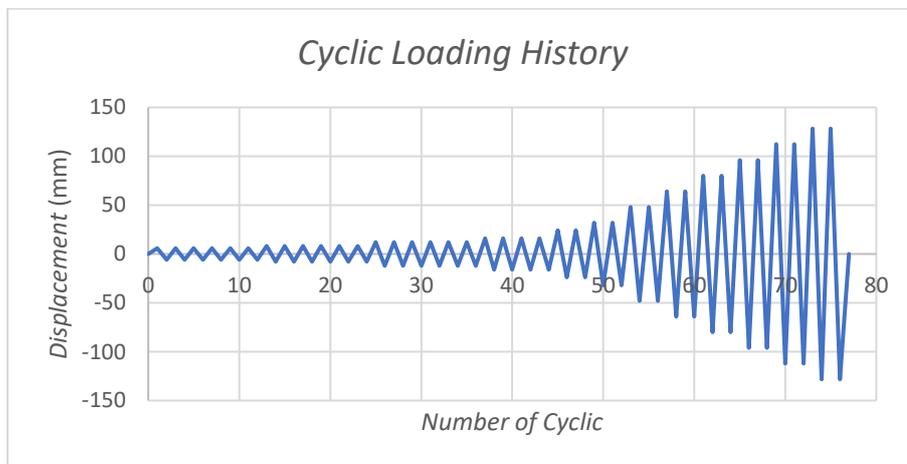
6. Mendefinisikan *boundary conditions*

Boundary condition dan pembebanan dapat didefinisikan pada *load modul*. *Boundary condition* yang didefinisikan adalah berupa perletakkan dan batasan lain seperti pengekangan diarah transversal penampang akibat adanya

balok anak, sedangkan pembebanan yang didefinisikan pada modul ini adalah berupa beban *displacement*. *Boundary condition* yang digunakan pada sambungan dapat dilihat pada Gambar 3.28. Beban yang diaplikasikan pada sambungan adalah beban siklik sesuai protokol pembebanan pada (ANSI/AISC 341-16, 2016), pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 3.29. Beban siklik ini kemudian diinputkan kedalam Abaqus pada menu *amplitude*.



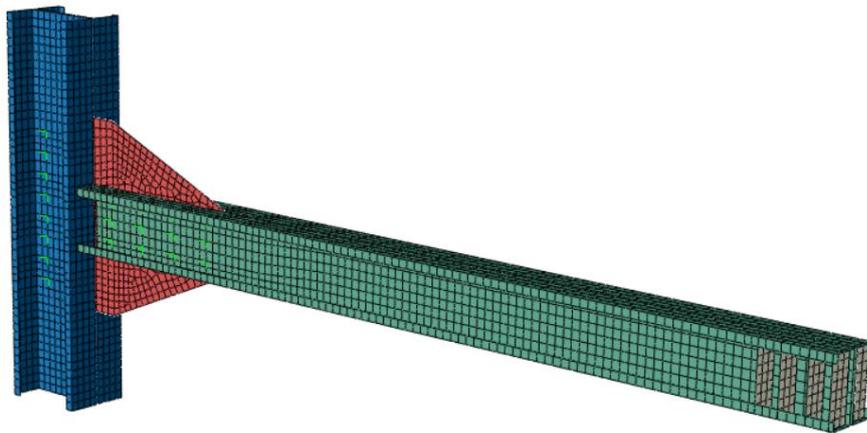
Gambar 3.28 *Boundary condition* sambungan



Gambar 3.29 Pembebanan Siklik

7. Melakukan *meshing* pada elemen-elemen sambungan

Setelah *boundary conditions* dan pembebanan telah didefinisikan langkah selanjutnya adalah membuat *meshing* pada tiap elemen sambungan. *Meshing* pada sambungan balok-kolom *bolted moment frame* menggunakan *meshing* dengan tipe elemen S8R (*8-node quadrilateral shell element with reduced integration*) yang terdapat di *library* Abaqus yang merupakan elemen hexahedral yang memiliki 6 *node* dimana setiap *nodenya* memiliki 6 derajat kebebasan translasi dan rotasi. Ukuran *mesh* yang digunakan pada setiap elemen adalah 20 mm x 20 mm. *Meshing* dari sambungan dapat dilihat pada Gambar 3.30.

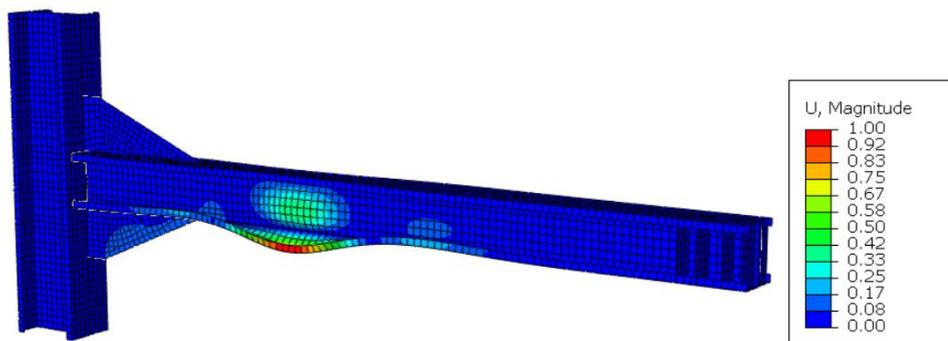


Gambar 3.30 *Mesh* dari elemen sambungan

8. Memodelkan *geometry imperfection*

Geometrical imperfections atau ketidaksempurnaan geometris merupakan faktor yang dapat mempengaruhi perilaku dari balok yang menyebabkan penurunan kekuatan baik dalam pengaruh beban monotonik ataupun siklik, sehingga *geometrical imperfection* perlu diperhitungkan dalam proses analisis. Spesimen sambungan diasumsikan dikekang oleh *lateral bracing* diarah transversal penampang sehingga *global buckling* dapat diabaikan dan yang diperhitungkan hanya *local* dan *distorsional buckling geometrical imperfections*. Kemudian dari keduanya dipilih mode yang memiliki tahanan *buckling* terkecil yang akan digunakan pada model utama. Nilai dari *local* dan *distorsional buckling geometrical imperfection* untuk baja lembaran dengan

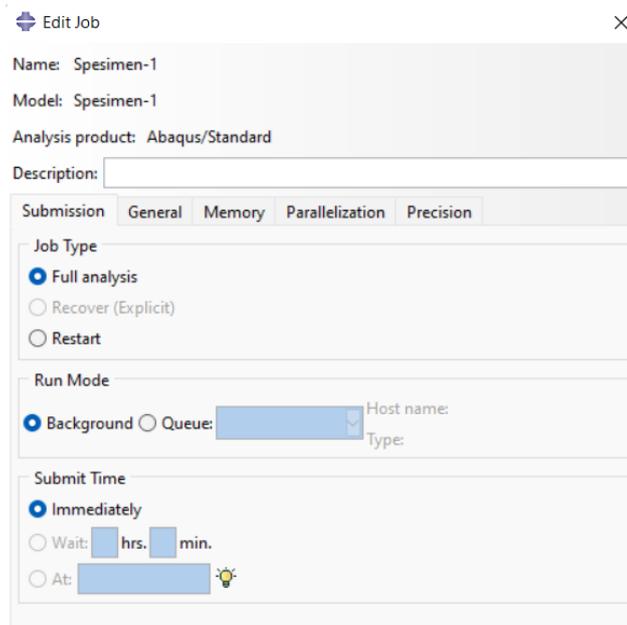
tebal kurang dari atau sama dengan 3 mm adalah 0.94t dan 0.34t seperti yang direkomendasikan oleh Scafer dan Pekoz (Schafer and Peköz, 1998). Sedangkan untuk pelat lembaran dengan tebal lebih dari 3 mm, besar nilai *imperfection* diasumsikan $0.3\lambda_s$ sesuai dengan rekomendasi oleh Walker, dimana λ_s adalah kelangsingan penampang. *Geometrical imperfection* dari *local* dan *distorsional buckling* dapat diperoleh dari *mode buckling* pertama dengan melakukan analisis *eigenvalue buckling* pada elemen sambungan balok-kolom CFS, dimana pada analisis monotonik ini dilakukan dengan memberikan beban *tip displacement* diarah vertikal (Y) yang menyebabkan *displacement* yang tidak simetris seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.31. Sedangkan untuk analisis siklik, mode tidak simetris diperoleh dari penggabungan hasil analisis diarah +Y dan -Y.



Gambar 3.31 *Geometrical Imperfection*

B. Tahap *analysis*

Setelah tahap *pre-processing* telah dilakukan, maka *running analysis* sambungan dapat dimulai dengan memilih *Job* pada Abaqus seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.32.



Gambar 3.32 *Running analysis* pada *Job* Abaqus

C. Tahap *post-processing*

Setelah *runing* dilakukan, maka output dari hasil running dapat diperoleh dimana output tersebut kemudian yang akan digunakan untuk mengevaluasi perilaku sambungan. Output yang dapat diperoleh seperti deformasi, tegangan, regangan, reaksi perletakan, dll. Output tersebut diperoleh pada fitur *result* pada *job* Abaqus.

3.6. Evaluasi Hasil Permodelan

Hasil dari permodelan spesimen sambungan *bolted moment frame* akan dilakukan perbandingan terhadap *backbone curve*, kapasitas momen, daktilitas, energi disipasi, kekakuan awal, dan analisis penurunan kekuatan dan kekakuan.

1. *Backbone curve*

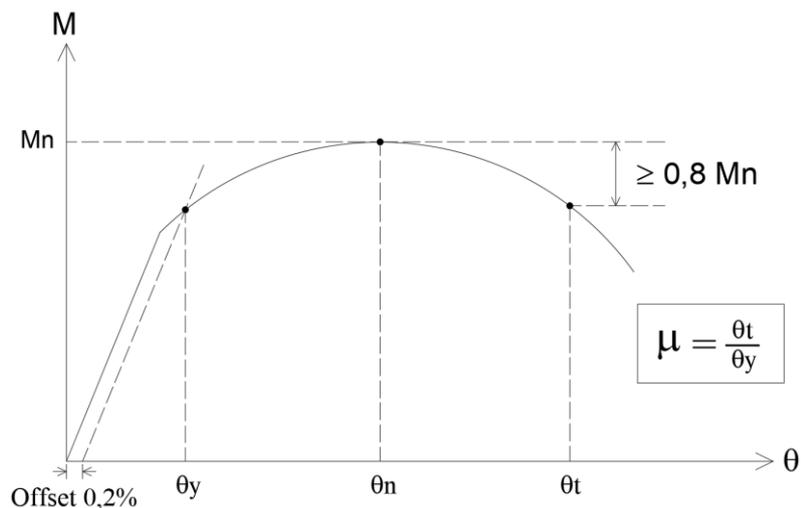
Backbone curve dapat diperoleh dari kurva histeresis yaitu dengan menghubungkan titik terluar dari tiap siklik pada grafik. Dari tiap spesimen sambungan akan dibandingkan kurva *backbone* sehingga dapat diketahui spesimen mana yang memiliki *backbone* yang terbaik.

2. Kapasitas momen

Kapasitas momen sambungan diukur dari kemampuan spesimen sambungan dalam menahan momen yang diakibatkan oleh pembebanan siklik, dengan diamati mulai dari pembebanan pertama, kemudian saat mencapai kapasitas lelehnya, hingga kapasitas ultimit. Kapasitas momen dapat diambil dari kurva histeresis hasil permodelan.

3. Daktilitas

Nilai daktilitas merupakan rasio antara nilai rotasi sambungan pada saat elemen mengalami kondisi target yaitu rotasi saat kapasitas momen sambungan berkurang 20% terhadap nilai rotasi pada saat elemen mengalami pelelehan pertama yang ditentukan dengan metode offset sebesar 0,2%. Gambar skematik mengenai penentuan nilai daktilitas dapat dilihat pada Gambar 3.33.



Gambar 3.33 Skema penentuan nilai rotasi untuk perhitungan daktilitas

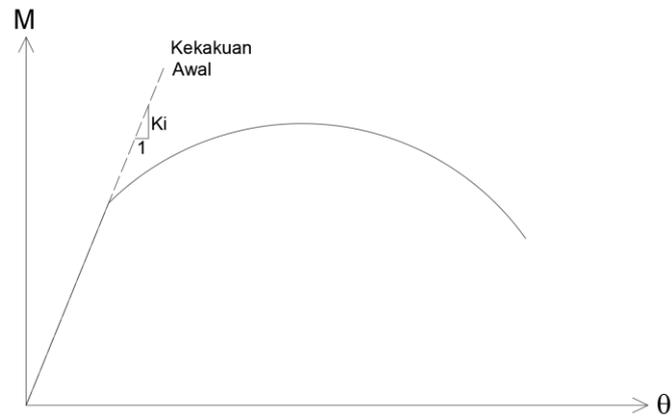
4. Energi disipasi

Energi disipasi sambungan merupakan kemampuan dari sambungan menyerap energi. Energi ini dapat diperoleh dengan menghitung luasan kurva histeresis. Semakin besar energi disipasi semakin baik perilaku sambungan dalam menyerap energi yang masuk.

5. Kekakuan awal

Kekakuan awal dari sambungan dapat dihitung dengan memperoleh nilai tangen kurva saat fase elastis. Kekakuan awal akan diinvestigasi untuk mengetahui apakah penggunaan stiffener mempengaruhi kekakuan awal dari sambungan.

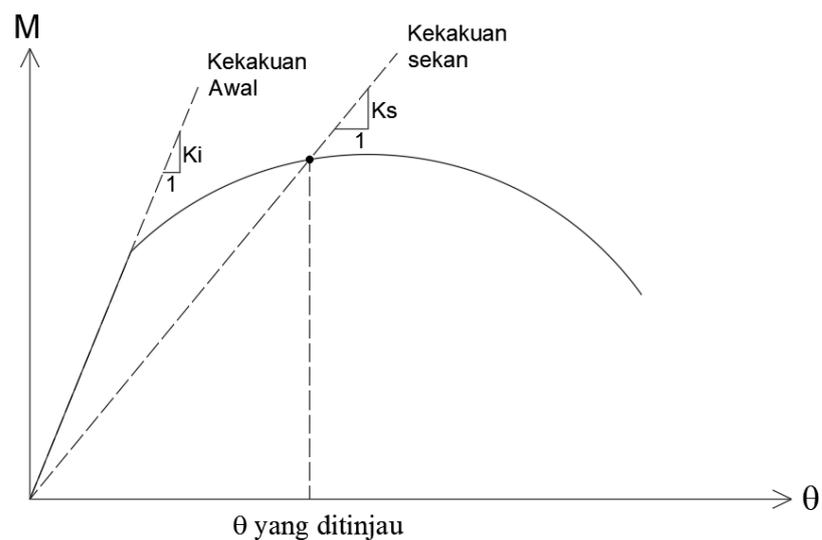
Gambar skematik mengenai penentuan nilai kekakuan awal dapat dilihat pada Gambar 3.34.



Gambar 3.34 Skema penentuan kekakuan awal

6. Analisis penurunan kekuatan dan kekakuan

Analisis penurunan kekuatan dan kekakuan perlu dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh stiffener terhadap peningkatan perilaku terutama pada kekuatan dan kekakuan. Analisis penurunan kekuatan dapat dilakukan dengan membuat grafik rasio nilai momen tiap rotasi terhadap momen maksimum dari tiap spesimen sambungan. Analisis penurunan dapat dilakukan dengan membuat grafik rasio secant stiffnes tiap rotasi terhadap kekakuan awal, skema penentuan secant stiffnes dapat dilihat pada Gambar 3.35.



Gambar 3.35 Skema penentuan kekakuan sekan dan kekakuan awal

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

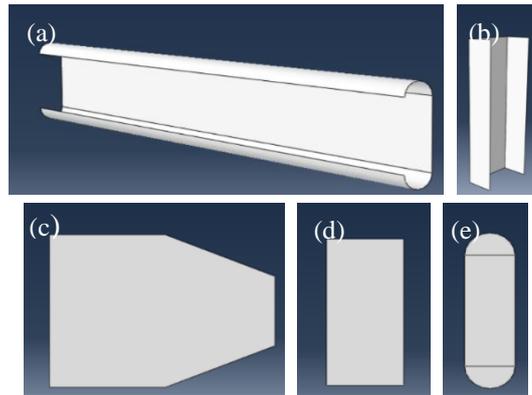
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

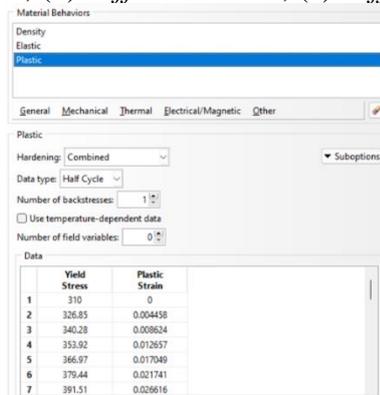
Pada bab ini akan dibahas mengenai perbandingan model validasi numerik dengan hasil tes eksperimental yang dilakukan oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012). Setelah validasi permodelan dilakukan, maka pembahasan akan berlanjut dengan memodelkan spesimen sambungan balok-kolom baja *cold-formed* untuk ditinjau dan dianalisis perilakunya.

4.2. Permodelan Sambungan Validasi dengan Abaqus

Tahap awal permodelan sambungan validasi oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012) adalah membuat geometri tiap elemen sambungan. Elemen sambungan terdiri dari balok *back-to-back channel*, kolom *back-to-back-channel*, *gusset plate*, *stiffener* balok, dan *stiffener* kolom. Elemen tersebut dimodelkan sebagai *3D shell element*. Permodelan elemen tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1. Setelah itu dilakukan input properti material sambungan validasi. Mutu baja dari sambungan tersebut adalah S275 dengan massa jenis 7850 kg/m, modulus elastisitas 210 GPa, *poisson ratio* 0,33. Kurva *stress-strain* yang digunakan untuk memodelkan *plastic behaviour* dapat dilihat pada Gambar 3.4 yang mengacu pada studi oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2013). Dibawah pengaruh beban siklik material elemen sambungan mengalami beban tarik dan tekan yang berulang, sehingga untuk memprediksi perilaku material dibawah beban siklik diperlukan permodelan material dengan *cyclic hardening rule*. Pada studi ini tipe *cylic hardening* yang digunakan adalah *combined hardening*, karena berdasarkan (Ryu dkk., 2018) tipe *isotropic hardening* dan *kinematic hardening* memiliki keterbatasan dalam memprediksi kelengkungan kurva histeresis dan perubahan permukaan yang mengalami pelelehan secara tepat. *Combined hardening* merupakan kombinasi dari *isotropic hardening* dan *nonlinear kinematic hardening*, permodelan ini dapat memprediksi perilaku histeresis yang lebih akurat (Ryu dkk., 2018). Parameter *combined hardening* dapat terkomputasi pada program Abaqus dengan menginputkan *stress-strain* material dan memilih data type *half-cylce*.

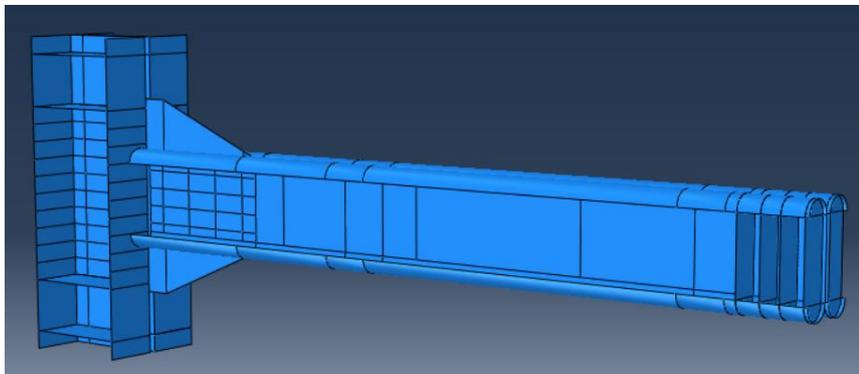


Gambar 4.1 Permodelan elemen sambungan validasi (a) Balok, (b) kolom, (c) *gusset plate*, (d) *stiffener* kolom, (e) *stiffener* balok



Gambar 4.2 Input kurva *stress-plastic strain* material sambungan validasi

Selanjutnya melakukan assembly tiap elemennya. Untuk mempermudah dalam melakukan assembly maka pada tiap elemennya memerlukan partisi. Sebagai contohnya untuk meletakkan *stiffener* kolom maka kolom perlu dipartisi pada lokasi yang akan dipasang *stiffener*. Selain itu partisi akan mempermudah permodelan *boundary condition* dan *constraint* yang akan digunakan. *Assembly* dari tiap elemen sambungan yang sudah dipartisi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



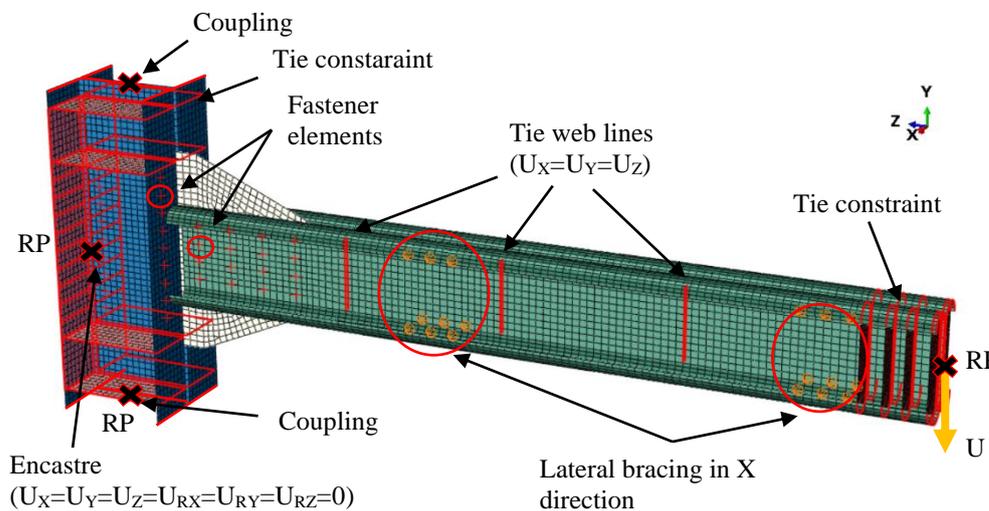
Gambar 4.3 *Assembly* elemen-elemen sambungan validasi

Setelah *assembly* dilakukan, *step* perlu didefinisikan. terdapat 2 *step* yang digunakan yaitu *initial* dan *loading step*. Pada tahap *loading step* inkrementasi dari analisis perlu didefinisikan. Pada *step loading*, *nlgeom* diaktifkan untuk analisis non-linear. Input *time period* sesuai dengan lama durasi pembebanan, pada analisis ini durasi pembebanan yaitu 78,63 detik. Setelah itu langkah berlanjut pada pendefinisian *interaction* dan *boundary condition* dari sambungan validasi. *Boundary condition* antar komponen yang didefinisikan pada model mengacu pada *set-up* tes ekperimental oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012). Pengaku kolom dihubungkan pada permukaan kolom dengan menggunakan “*Tie*” *constraint*, pengaku kolom digunakan agar kolom tetap elastis dan permodelan pengaku kolom dapat mempengaruhi respon rotasi dari sambungan (Tartaglia dkk., 2018). Sebagai catatan pada studi ini diasumsikan *panel zone* tetap berada pada kondisi elastis. Pada *set-up* tes eksperimental, kedua balok dihubungkan dengan pelat pengisi yang dibaut, di Abaqus pelat ini dimodelkan dengan “*Tie*” *constraint*, sehingga kedua permukaan balok dapat terhubung dan terikat bersama di arah U_x , U_y , U_z . Penahan lateral pada *set-up* tes yang mencegah deformasi kearah luar bidang dimodelkan dengan *me-restrained* deformasi diarah X. Untuk permodelan pembebanan diujung balok *node* pada ujung balok dipasangkan bersama pada centroidnya dengan menggunakan *coupling constraint*. Untuk mencegah terjadinya konsentrasi tegangan diujung balok maka pengaku balok perlu dipasang, pengaku balok dihubungkan pada permukaan balok dengan menggunakan “*Tie*” *constraint*. Pada permodelan perletakkan pada kolom, bagian atas kolom *di-restrained* di arah U_x dan U_y sedangkan bagian bawah kolom *di-restrained* di arah U_x, U_y , dan U_z . Permodelan *boundary condition* pada Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pembebanan siklik pada ujung balok mengacu pada protokol pembebanan (ANSI/AISC 341-05, 2005) *chapter* S6.2, pembebanan ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Pada studi ini tiap baut dimodelkan dengan *point-based fastener* yang terdapat di *library* Abaqus. Untuk memodelkan baut dengan *point-based fastener*, jari-jari baut perlu didefinisikan pada “*physical radius*” yang akan merepresentasikan jari-jari baut dan untuk mensimulasi interaksi antara baut dan

permukaan lubang baut. Pada studi ini dipilih perilaku baut yang *rigid* yang akan di *assign* ke tiap baut. Permodelan dengan *point-based fastener* ini dipilih karena lebih sederhana dan lebih efisien dalam komputasional terutama untuk pembebanan siklik, berbeda halnya apabila baut dimodelkan secara solid, tentu akan menjadi semakin kompleks dan tidak efisien secara komputasional pada pembebanan siklik apalagi jika terdapat banyak baut yang akan dimodelkan. Selain itu juga permodelan baut dengan *point-based fastener* mengurangi resiko tidak konvergensya kalkulasi Abaqus.

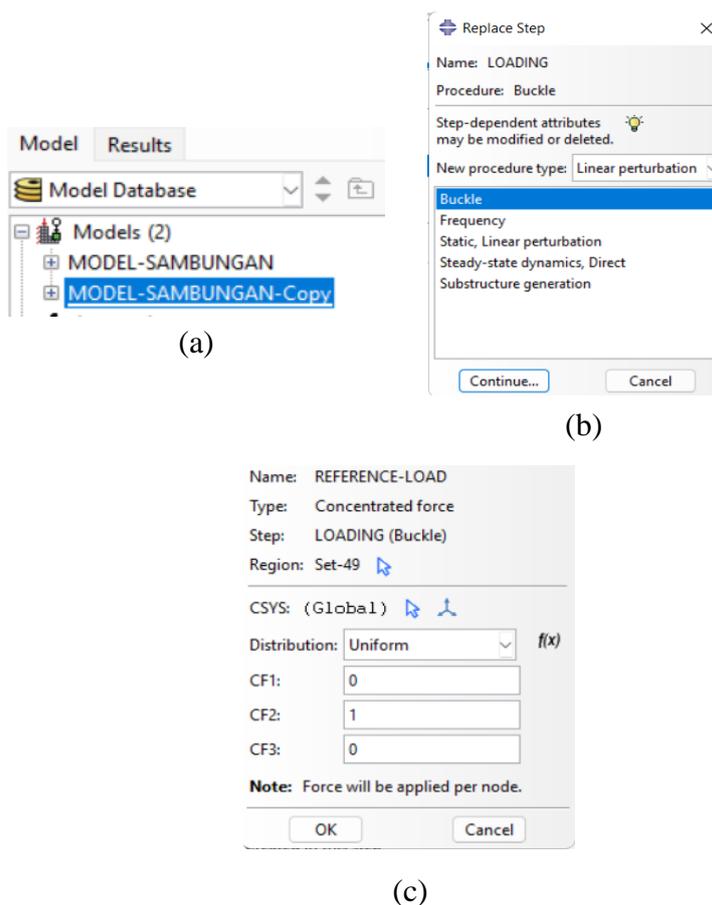
Selanjutnya adalah melakukan *meshing* pada tiap elemen sambungan validasi. Tipe elemen yang digunakan adalah S8R (8-node quadrilateral shell element with reduced integration) yang terdapat pada *library* Abaqus, permodelan ini dinilai lebih akurat dalam memprediksi perilaku histeresis dan kapasitas energi disipasi dari sambungan baja *cold-formed* (Foster dkk., 2016). Selain itu berdasarkan (Bagheri Sabbagh dkk., 2013) menggunakan *shell elements* dapat menangkap *local instabilities* yang terjadi. Ukuran *mesh* yang digunakan adalah 20 x 20 mm kn arena dinilai cukup akurat dan efisien dalam komputasional untuk memodelkan sambungan baja *cold-formed* (Ye dkk., 2019).



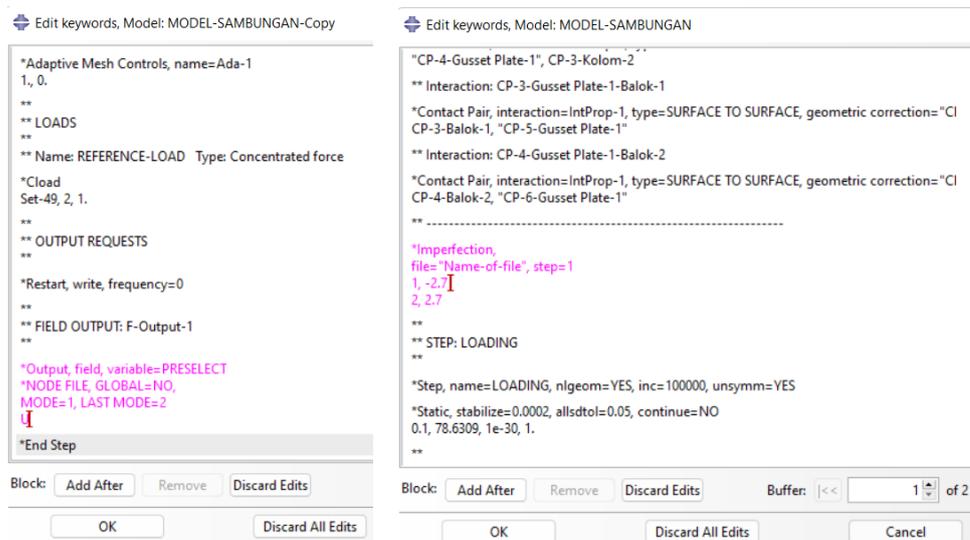
Gambar 4.4 *Boundary condition* dan *constraint* sambungan validasi

Setelah *boundary condition*, *interaction*, dan *mesh* telah didefinisikan, langkah selanjutnya adalah menambahkan *geometry imperfection* atau ketidaksempurnaan geometri. *Geometry imperfection* ini didapatkan melalui

eigenvalue buckling analysis. Analisis tersebut dapat dilakukan dengan membuat *copy* dari model sambungan. Kemudian pada model baru, *step loading* di-*replace* dengan mengganti *procedure type* menjadi *linear perturbation*, kemudian dipilih tipe *buckle*. Langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.5. Kemudian pada model baru beban *displacement* pada menu *load* dihapus dan digantikan dengan beban terpusat pada titik pembebanan di ujung balok sebesar 1 satuan ke arah Y. Kemudian pada model baru klik kanan untuk mengedit *keyword*, dimana akan ditambahkan *command* agar data nodal hasil *eigenvalue buckling analysis* dapat ter-outputkan dalam sebuah file dengan format *fil file*. Kemudian setelah dilakukan *running analysis*, file tersebut dapat dijadikan sebagai kondisi inisial dari analisis model utama dengan cara mengedit *keyword* dengan menambahkan *command* baru. Langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6.



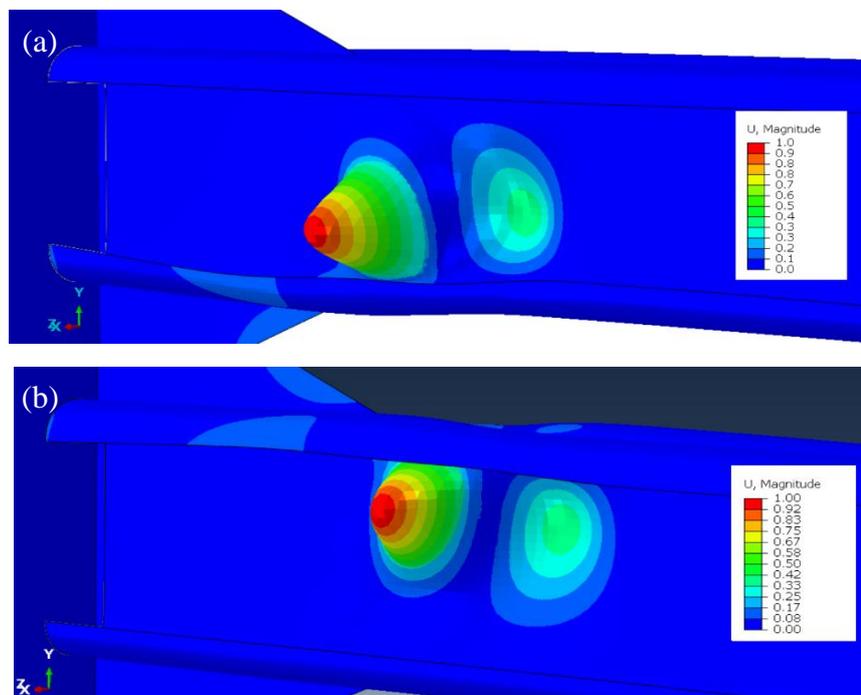
Gambar 4.5 Langkah melakukan *eigenvalue buckling analysis* (a) membuat *copy* model, (b) *replace step* pembebanan, (c) beban terpusat



(a) (b)

Gambar 4.6 Command dalam eigenvalue buckling analysis (a) command dalam copy model, (b) command dalam file model utama

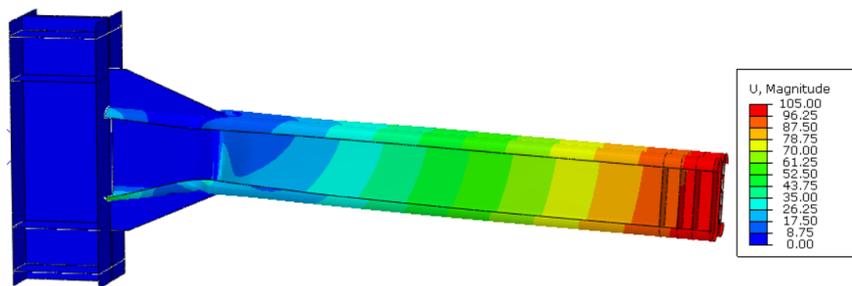
Setelah dilakukan running pada *eigenvalue buckle analysis*, akan diperoleh hasil output berupa deformasi pada setiap mode. Untuk analisis beban siklik akan mode yang digunakan adalah mode 1 dan mode 2. Kemudian kedua mode ini akan dikombinasikan untuk analisis pada model utama sambungan. Hasil dari *eigenvalue buckling analysis* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



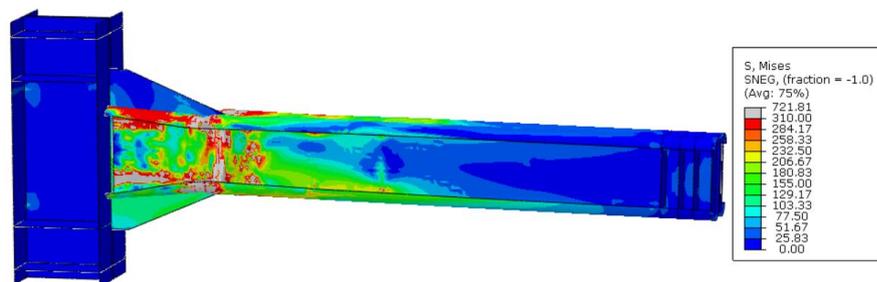
Gambar 4.7 Bentuk *geometry imperfection* (a) mode 1 dan (b) mode 2

4.3. Hasil Permodelan Sambungan Validasi dengan Abaqus

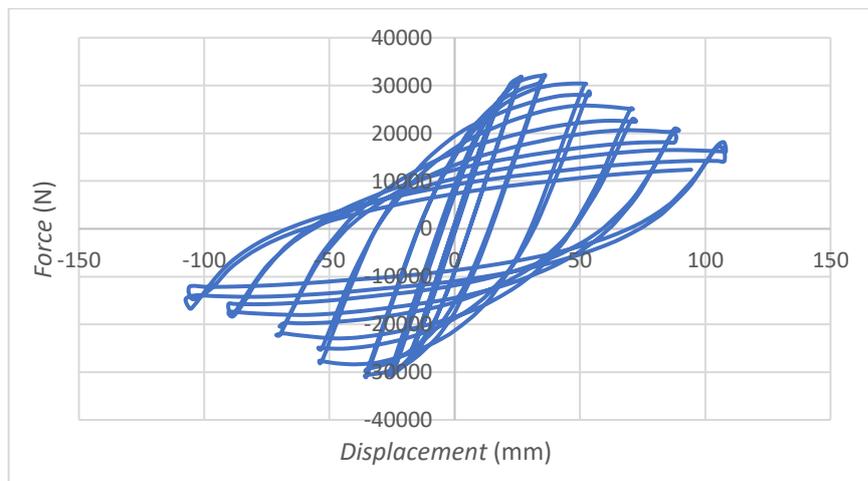
Setelah proses permodelan telah selesai, maka *running* dapat dilakukan. Hasil analisis numerik dari program Abaqus yang digunakan antara lain deformasi maksimum, kontur tegangan, dan kurva histeresis yang merupakan hubungan antara reaksi perletakkan dengan beban *displacement* pada ujung balok. Kurva histeresis tersebut kemudian akan diubah menjadi kurva momen-rotasi yang diambil didepan kolom. Hasil analisis dari model validasi sambungan balok-kolom baja *cold-formed* dapat dilihat pada Gambar 4.8 hingga 4.10.



Gambar 4.8 Deformasi maksimum sambungan validasi



Gambar 4.9 Kontur tegangan sambungan validasi



Gambar 4.10 Kurva histeresis sambungan validasi

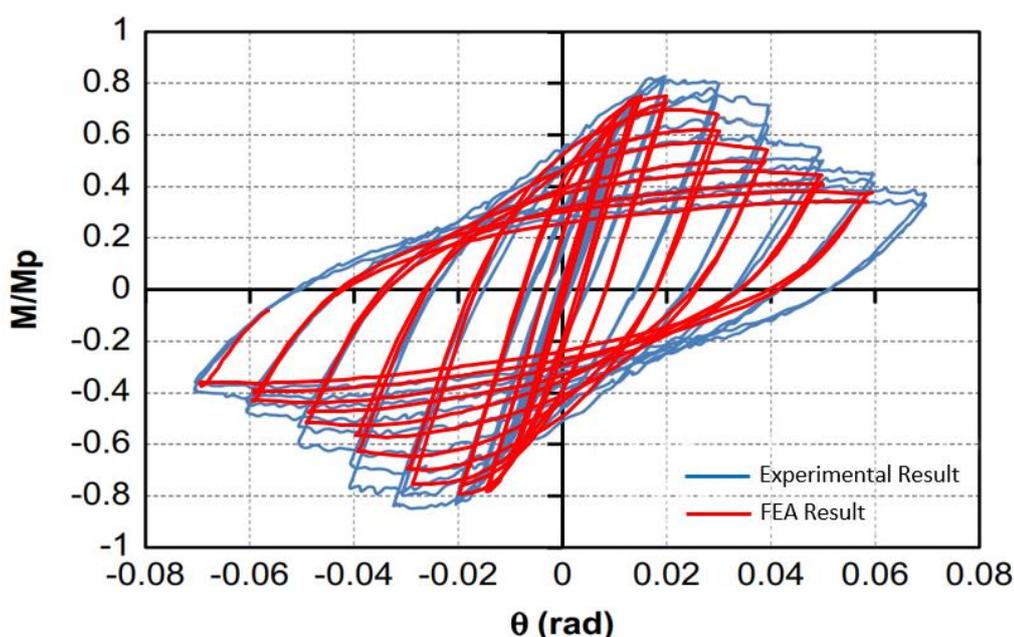
4.4. Verifikasi Hasil Permodelan Abaqus dengan Hasil Eksperimen

Keakuratan parameter-parameter yang diinputkan kedalam program Abaqus perlu diuji, sehingga proses verifikasi hasil permodelan perlu dilakukan. Verifikasi permodelan sambungan balok-kolom *cold-formed* dilakukan dengan membandingkan kurva momen-rotasi hasil permodelan numerik dengan kurva momen-rotasi hasil pengetesan eksperimental yang dilakukan oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012).

Perbandingan antara hasil analisis numerikal dan eksperimen disajikan dalam bentuk kurva momen-rotasi seperti terlihat pada Gambar 4.11, momen yang terjadi didepan kolom dinormalisasi menjadi momen plastis balok (M_p), dimana nilai M_p adalah 75 kNm menggunakan tegangan luluh aktual sebesar 310 MPa menurut Bagheri Sabbagh dkk., (2012). Perhitungan momen (M) dan rotasi (θ) diambil pada ujung sambungan sesuai Gambar 3.5. Dapat dilihat bahwa hasil simulasi numerikal menunjukkan kesesuaian dengan hasil pengujian eksperimental. Pada daerah elastis, hasil numerikal sesuai dengan hasil yang dicatat dalam uji eksperimental. Hal ini menunjukkan bahwa model elemen hingga berhasil mensimulasikan kekakuan awal sambungan balok-kolom yang diacu. Dari Gambar 4.11 dapat diamati bahwa momen puncak model elemen hingga terjadi pada $\theta = 0,02$ rad dengan besaran momen $0,75M_p$, sedangkan hasil eksperimen menunjukkan momen puncak terjadi pada $\theta = 0,02$ rad dengan besaran momennya adalah $0,81M_p$. Selisih kapasitas momen adalah sebesar 7%. Meskipun puncak momen permodelan Abaqus terjadi pada rotasi yang sama dengan pengujian eksperimental, terdapat perbedaan sebesar 4,8% pada besar momen puncak. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan ketidaksempurnaan geometrik dan properti material antara permodelan dan spesimen benda uji. Puncak momen yang lebih rendah dari permodelan Abaqus dapat menunjukkan bahwa model menghasilkan desain yang lebih konservatif.

Akan tetapi dapat diamati pada Gambar 4.11 bahwa kurva momen-rotasi model numerik memiliki rotasi maksimum yang lebih kecil pada kuadran I yaitu 0,058 rad, sedangkan pada hasil eksperimental rotasi yang terjadi mencapai 0,07 rad. Rotasi yang lebih kecil pada model numerikal diakibatkan oleh analisis

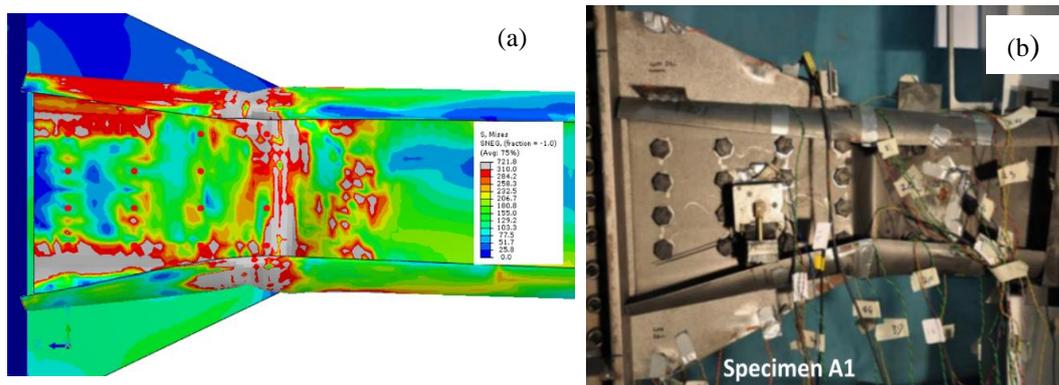
numerikal yang *divergence*. Faktanya divergensi numerik tersebut tidak selalu menunjukkan *failure point* yang aktual. Diamati bahwa saat crack mulai terinisiasi (dimana *ultimate strain* sudah tercapai) analisis numerikal gagal untuk konvergen. Setelah crack tersebut terjadi perilaku histeresis dari sambungan tidak dapat tertangkap, sehingga sambungan sebenarnya masih memiliki kekuatan dalam menerima rotasi yang lebih besar lagi. Selisih rotasi hasil analisis numerik dan eksperimental dapat diartikan sebagai *residual strength*. *Residual strength* adalah beban atau gaya yang masih dapat dipikul oleh benda atau bahan yang rusak tanpa mengalami kegagalan. Adanya *residual strength* tersebut dapat menunjukkan bahwa permodelan numerikal sambungan balok-kolom lebih konservatif.



Gambar 4.11 Perbandingan kurva momen rotasi hasil permodelan Abaqus dan hasil eksperimental oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012)

Selain kurva momen-rotasi, untuk perbandingan yang lebih baik lagi, dilakukan perbandingan deformasi keruntuhan antara model numerikal dan uji eksperimental yang dapat dilihat pada Gambar 4.12. Perbandingan deformasi keruntuhan diambil pada akhir pembebanan siklik dimana putaran mencapai 0,069 rad. Dapat dilihat bahwa hasil simulasi numerik menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil pengujian eksperimen. Dari hasil analisis Abaqus didapatkan bahwa perilaku rotasi sambungan balok-kolom didominasi oleh deformasi lentur dan tekuk lokal pada balok, hal ini sesuai dengan perilaku rotasi yang diperoleh dari pengujian

eksperimental. Selain itu, deformasi keruntuhan dari analisis elemen hingga serupa dengan yang tercatat dalam pengujian eksperimental, dimana terjadi tekuk pada sayap dan badan balok di daerah sambungan yang menyebabkan hilangnya kekuatan secara tiba-tiba, sayap balok terbuka seiring dengan bertambahnya perpindahan. Dengan demikian, model numerik dapat mensimulasikan dengan baik perilaku rotasi sambungan balok-kolom dan dapat memprediksi bentuk umum dan lokasi tekuk lokal/distorsi pada sambungan balok-kolom.

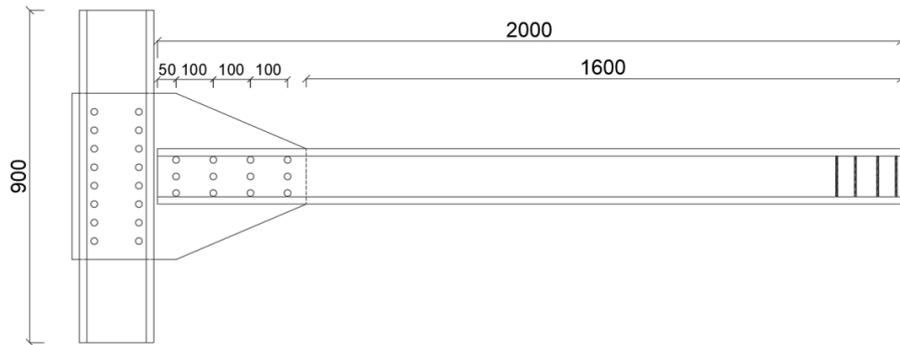


Gambar 4.12 Perbandingan pola keruntuhan antara (a) hasil permodelan Abaqus dan (b) hasil eksperimental oleh Bagheri Sabbagh dkk., (2012)

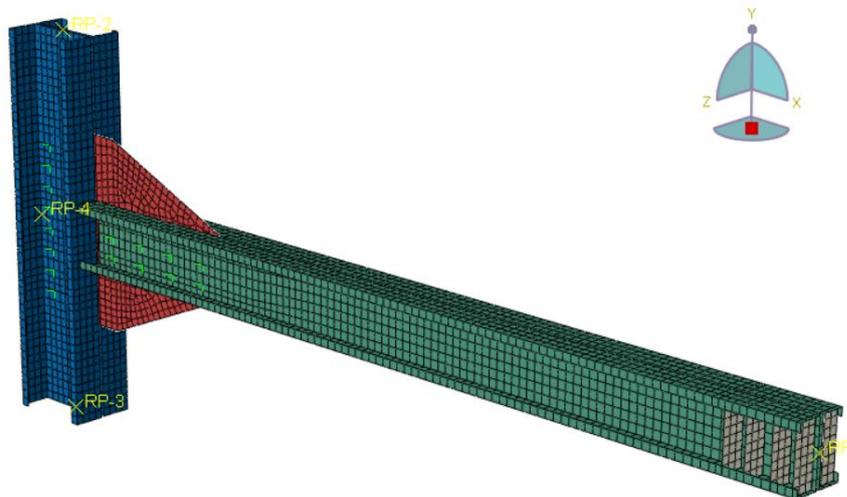
4.5. Analisis Spesimen

4.5.1. Analisis Spesimen Sambungan Tanpa *Stiffener* (S1)

Spesimen S1 merupakan spesimen benchmark, dimana sambungan balok-kolom baja *cold-formed* ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point-based fastener* di Abaqus. Spesimen ini belum diberikan perkuatan *stiffener* pada daerah sambungannya. Sehingga spesimen sambungan lain dengan *stiffener* dapat dibandingkan dengan spesimen S1 dan dapat diketahui pengaruh dari *stiffener* pada perilaku sambungan. Detail dari spesimen S1 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.13 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.13 Detail 2D sambungan spesimen S1

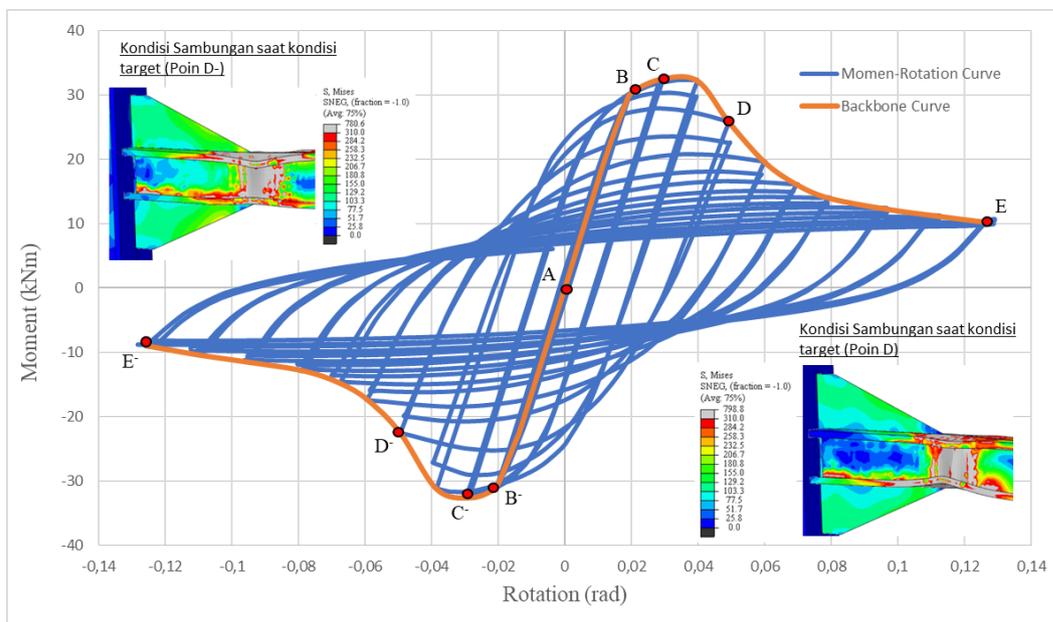


Gambar 4.14 Permodelan numerik 3D spesimen S1

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S1 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terprakualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

Kurva histeresis momen-rotasi (moment-rotation curve) dan kurva *backbone* spesimen S1 dapat dilihat pada Gambar 4.15. Kurva momen-rotasi diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Sedangkan kurva backbone diperoleh dengan menghubungkan titik-titik terluar dari kurva momen-rotasi. Momen yang

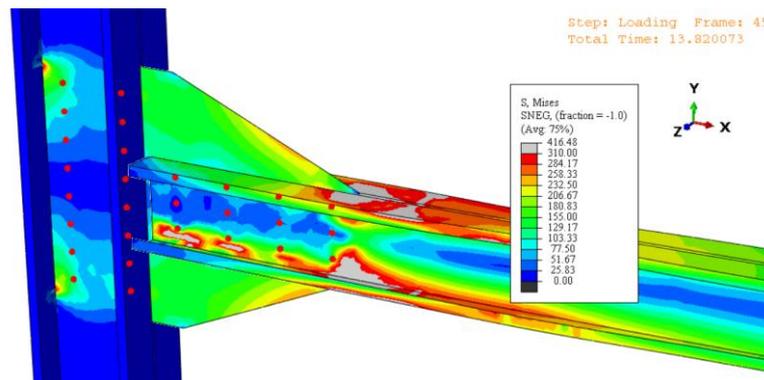
diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan *displacement* diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C⁻ merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona *postbuckling* (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D⁻ merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.15 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻. Daa



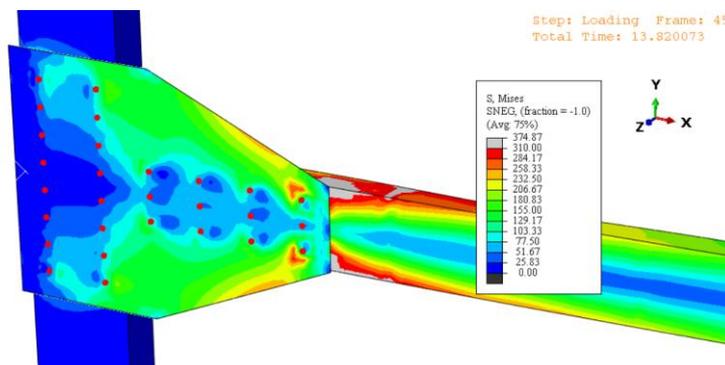
Gambar 4.15 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S1

Pada gambar 4.15 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 2,87% rad yaitu dengan momen sebesar 32,37 kNm. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok

adalah 31,97 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,45. Sehingga spesimen S1 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.15 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1622,93 kNm/rad.



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom



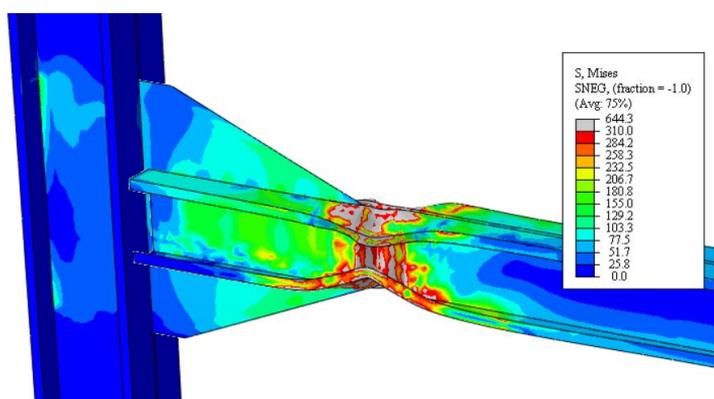
(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.16 Kondisi sambungan spesimen S1 saat terjadi pelelehan pertama

Pada Gambar 4.16 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.16(a) dan tegangan pada *gusset plate* dapat dilihat pada Gambar 4.16(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan *gusset plate* terdapat konsentrasi tegangan yang besar

masing masing adalah 248,2 MPa dan 275,8 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S1 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.17. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan *gusset plate*. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-5 saat rotasi 1,34% rad, dimana tekuk terjadi pada sayap atas balok kemudian berlanjut pada sayap bawah balok dan selanjutnya tekuk mulai terjadi pada badan balok. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir. Selain itu diamati bahwa seiring bertambahnya beban *displacement*, sayap pada ujung penampang balok yang berada didepan kolom terus terbuka. Sehingga *stiffener* balok perlu dipasang pada dua area ini yaitu didepan *gusset plate* dan pada ujung penampang balok didepan kolom.

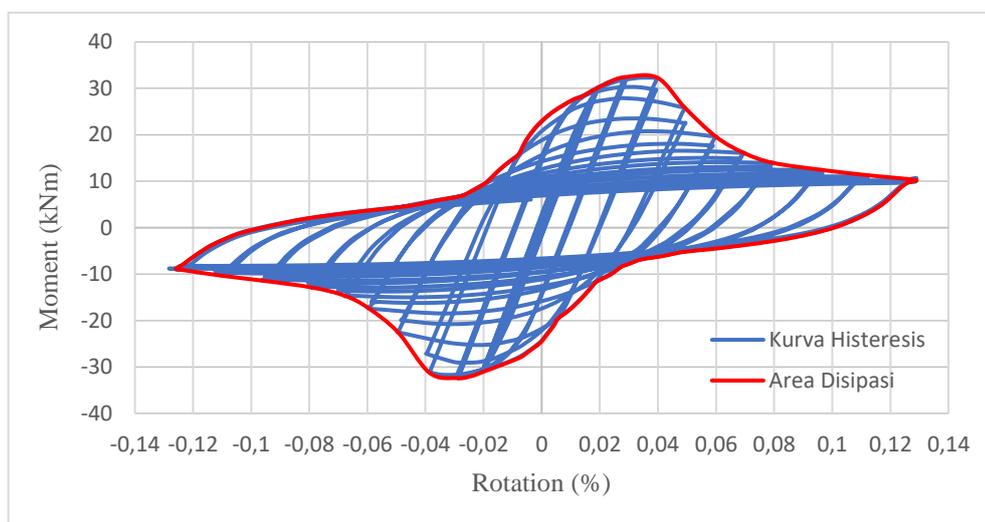


Gambar 4.17 Pola keruntuhan sambungan S1 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelepasan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.15. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelepasan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan

berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.15 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,02% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 3,9% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 1,93.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S1 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S1 dapat dilihat pada Gambar 4.18, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 6,14 kNm-rad.



Gambar 4.18 Area disipasi energi spesimen S1

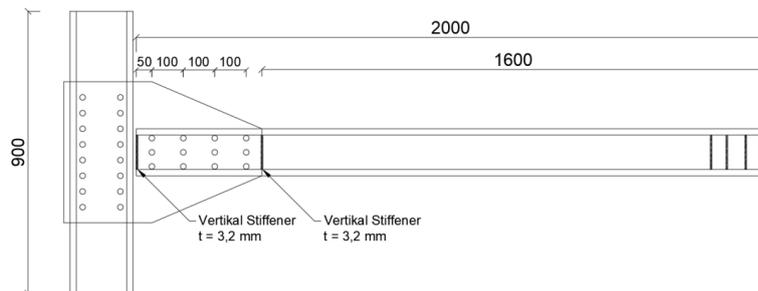
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S1, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kapasitas Spesimen Sambungan S1

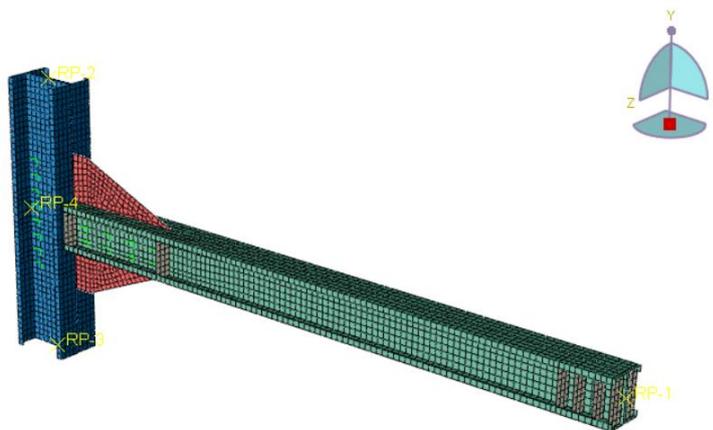
Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	32,37 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	31,97 kNm > 0,8 M_p =21,92 kNm...(OK)
Rotasi Maksimum	0,128 rad
Daktilitas	2,341
Energi Disipasi	6,14 kNm-rad
Kekakuan Awal	1622,93 kNm/rad

4.5.2. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 2 Vertikal Stiffener (S2)

Spesimen S2 merupakan spesimen sambungan yang diberi perkuatan stiffener balok pada ujung balok didepan kolom dan didepan *gusset plate*. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, gusset plate dengan ketebalan 6 mm, *stiffener* balok dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Spesimen ini merupakan spesimen S1 yang telah diberi perkuatan berdasarkan pola kegagalan pada spesimen S1. Dengan ditambahkannya stiffener balok diharapkan dapat menunda tekuk pada sayap dan badan balok sehingga didapatkan perilaku sambungan yang lebih baik. Detail dari spesimen S2 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.19 Detail 2D sambungan spesimen S2



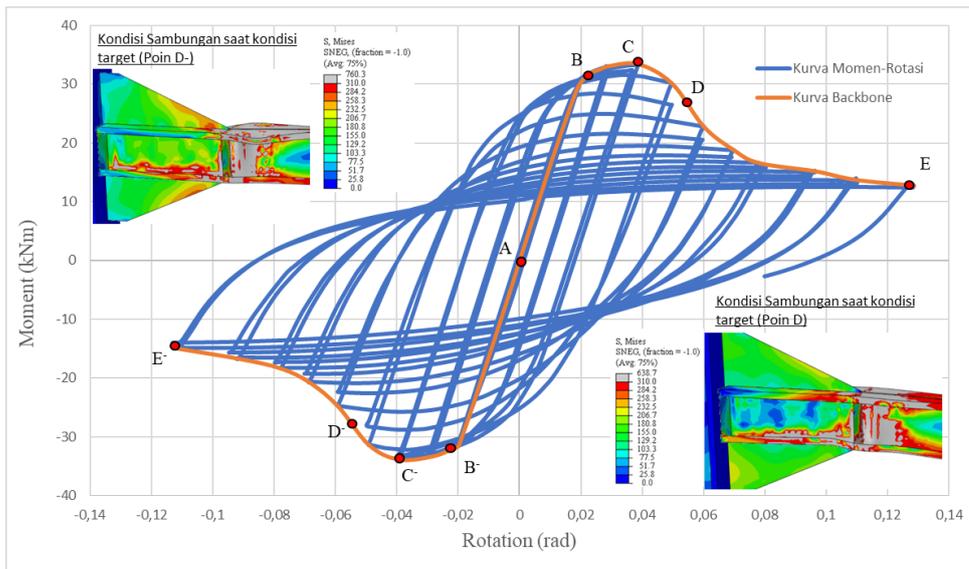
Gambar 4.20 Permodelan numerik 3D spesimen S2

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S2 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terpraktualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

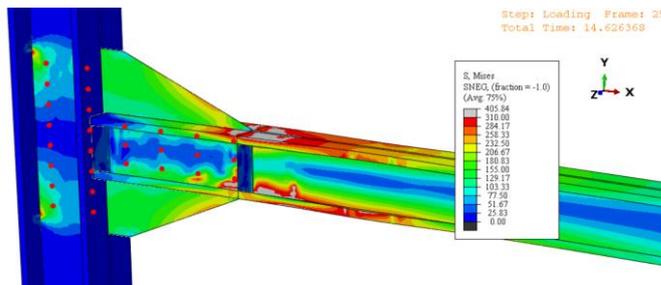
Kurva histeresis momen-rotasi (moment-rotation curve) spesimen S2 dapat dilihat pada Gambar 4.21. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C⁻ merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D⁻ merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.21 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻.

Pada Gambar 4.21 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 3,87% rad yaitu dengan momen sebesar 33,41 kNm. Kapasitas sambungan S2 terhadap spesimen S1 meningkat sebesar 3,18% rad. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 32,97 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu

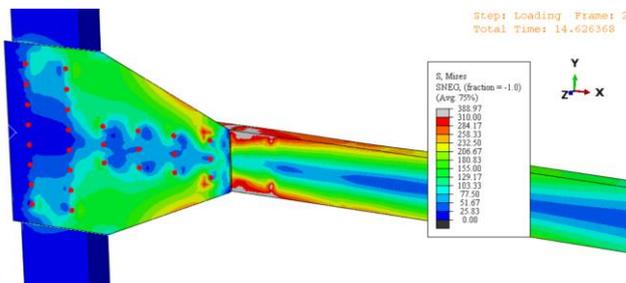
sebesar 21,92 kNm. Kapasitas momen saat 4% rad mengalami peningkatan dari spesimen S1 sebesar 3,1% rad. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,5. Sehingga spesimen S2 memenuhi persyaratan sambungan Special Moment Frame (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.21 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1643,10 kNm/rad.



Gambar 4.21 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S2



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom

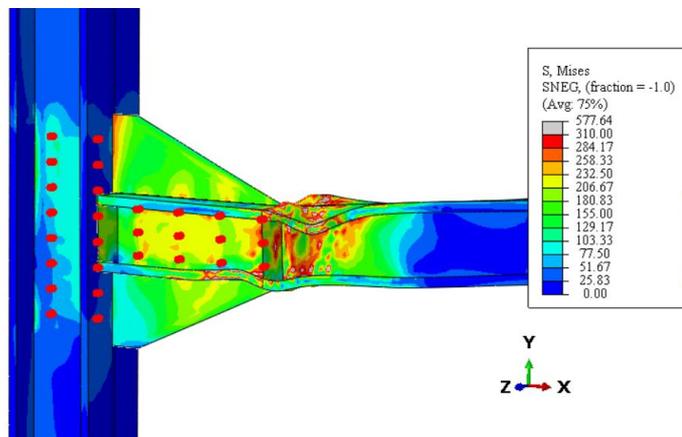


(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.22 Kondisi sambungan spesimen S2 saat terjadi pelelehan pertama

Pada Gambar 4.22 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.22(a) dan tegangan pada gusset plate dapat dilihat pada Gambar 4.22(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok didepan gusset plate terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan gusset plate terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 251,8 MPa dan 276,3 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

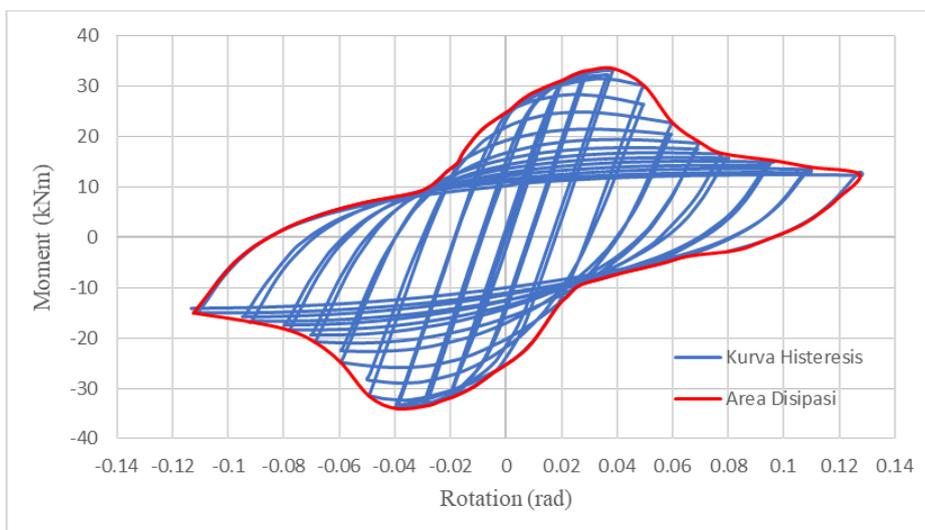
Pada spesimen S2 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada gambar 4.23. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan gusset plate. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-5 saat rotasi mencapai 2,21% rad, dimana tekuk terjadi pada sayap atas balok didepan gusset plate kemudian berlanjut pada sayap bawah balok dibelakang *gusset plate* dan selanjutnya tekuk mulai terjadi pada badan balok. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir. Tekuk lokal pada sayap dan balok tersebut semakin membesar hingga menimbulkan deformasi pada akhir fase pembebanan seperti Gambar 4.23. Karena tekuk mulai terinisiasi pada balok didepan *gusset plate*, oleh karena itu *stiffener* akan dipasang sejarak d balok yaitu 130 mm.



Gambar 4.23 Pola keruntuhan sambungan S2 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelepasan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.21. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelepasan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari gambar 4.21 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,17% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 5,55% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 2,53. Daktilitas pada spesimen S2 meningkat sebesar 8,25% terhadap spesimen S1.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S2 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S2 dapat dilihat pada Gambar 4.24, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 6,95 kNm-rad.



Gambar 4.24 Area disipasi energi spesimen S2

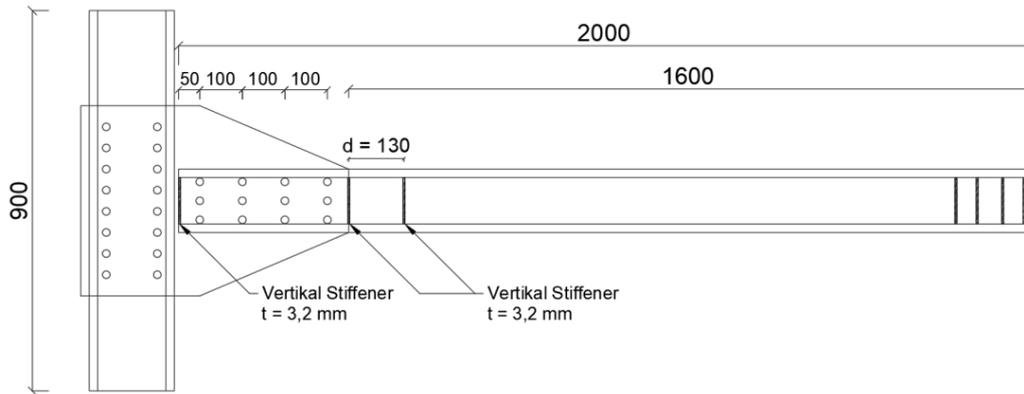
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S2, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kapasitas Spesimen Sambungan S2

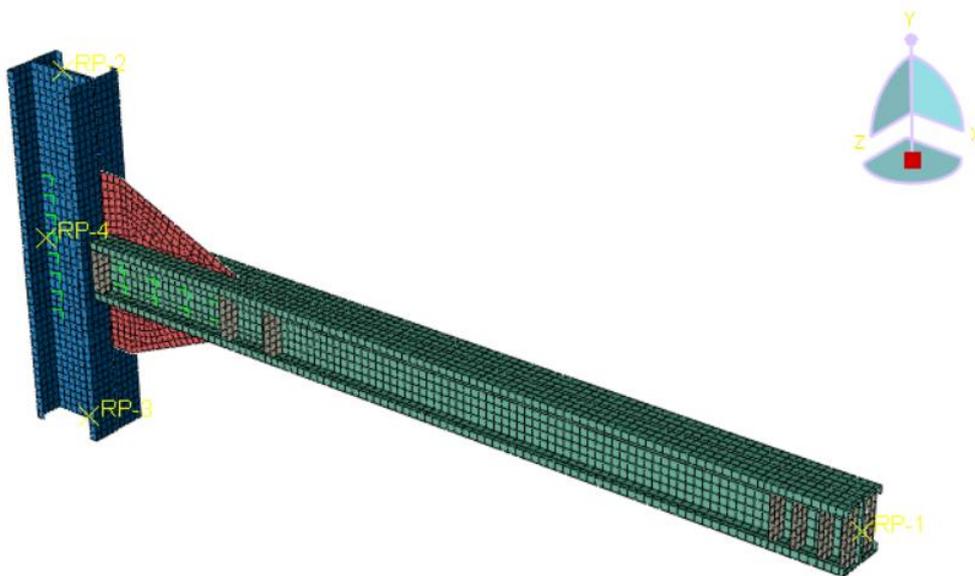
Kapasitas	Nilai
Momen Max (Mu)	33,41 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	32,97 kNm > 0,8 Mp = 21,92 kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,128 rad
Daktilitas	2,534
Energi Disipasi	6,95 kNm-rad
Kekakuan Awal	1643,10 kNm/rad

4.5.3. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal Stiffener (S3)

Spesimen S3 merupakan sambungan spesimen S2 yang diberi tambahan perkuatan *stiffener* balok sejarak 130 mm didepan *gusset plate*. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, *stiffener* balok dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Tambahan *stiffener* balok pada spesimen S3 ditentukan berdasarkan pola kegagalan dari sambungan spesimen S2. Dimana awal kegagalan dari sambungan adalah tekuk lokal pada sayap balok didepan *gusset plate*. Sehingga pada spesimen S3 ditambahkan *stiffener* didepan *gusset plate* dengan jarak d balok yaitu 130 mm. Detail dari spesimen S3 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.26.

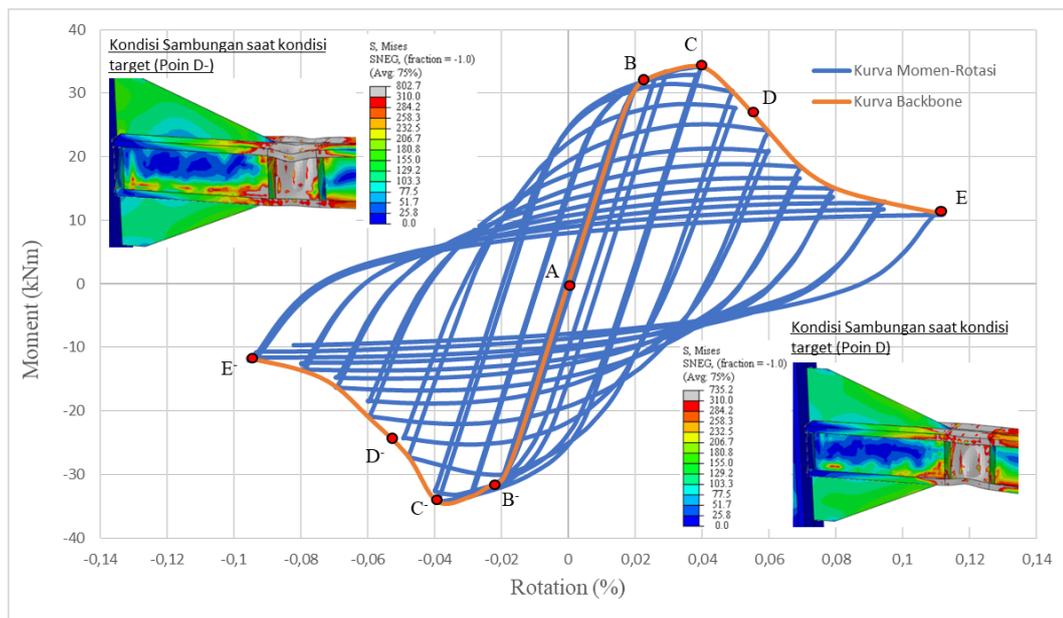


Gambar 4.25 Detail 2D sambungan spesimen S3



Gambar 4.26 Permodelan numerik 3D spesimen S3

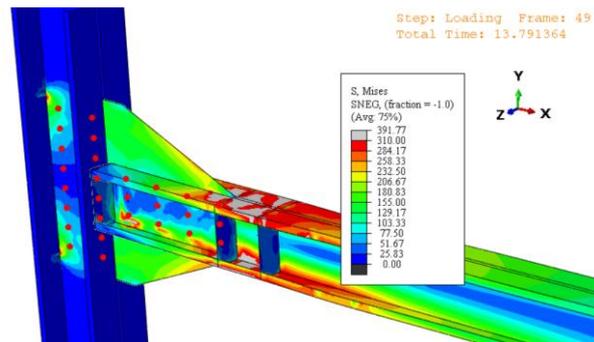
Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S3 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terpraktualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.



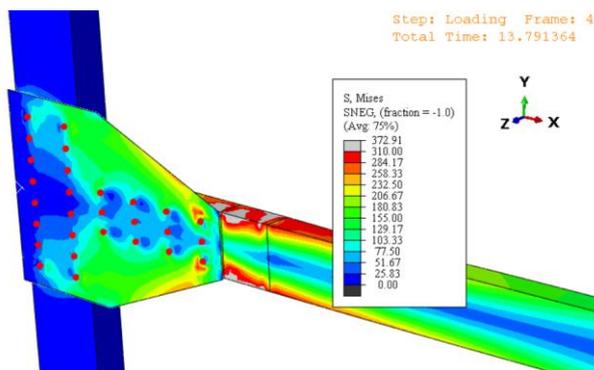
Gambar 4.27 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S3

Kurva histeresis momen-rotasi (*moment-rotation curve*) spesimen S3 dapat dilihat pada Gambar 4.27. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan gusset plate. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C⁻ merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D⁻ merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.27 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻.

Pada Gambar 4.27 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 4,01% yaitu dengan momen sebesar 34,15 kNm. Kapasitas momen spesimen S3 meningkat sebesar 5,49% terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk lokal pada sayap balok kemudian tekuk lokal terjadi pada badan balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 34,12 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Kapasitas momen spesimen S3 saat terjadi rotasi 4% rad meningkat sebesar 6,69% terhadap spesimen S1. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,55. Sehingga spesimen S3 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.27 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1651,3 kNm/rad.



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom



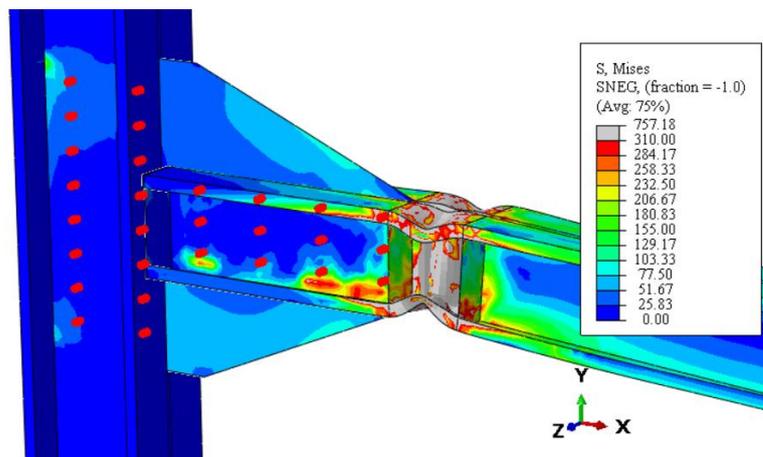
(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.28 Kondisi sambungan spesimen S1 saat terjadi pelelehan pertama

Pada Gambar 4.28 dapat diamati kondisi sambungan S3 saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.28(a) dan tegangan pada *gusset plate* dapat dilihat pada Gambar 4.28(b). Daerah

sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan *gusset plate* terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 268,62 MPa dan 274,63 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S3 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.29. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan *gusset plate*. Tekuk lokal mulai terinisiasi pada siklus ke-6 saat rotasi 2,2% rad, dimana tekuk lokal terjadi pada sayap balok didepan *gusset plate* (diantara dua *stiffener* depan) selanjutnya tekuk mulai terjadi pada badan balok. Tekuk pada badan balok pada rotasi mengakibatkan penurunan kekuatan sambungan yang cukup signifikan.

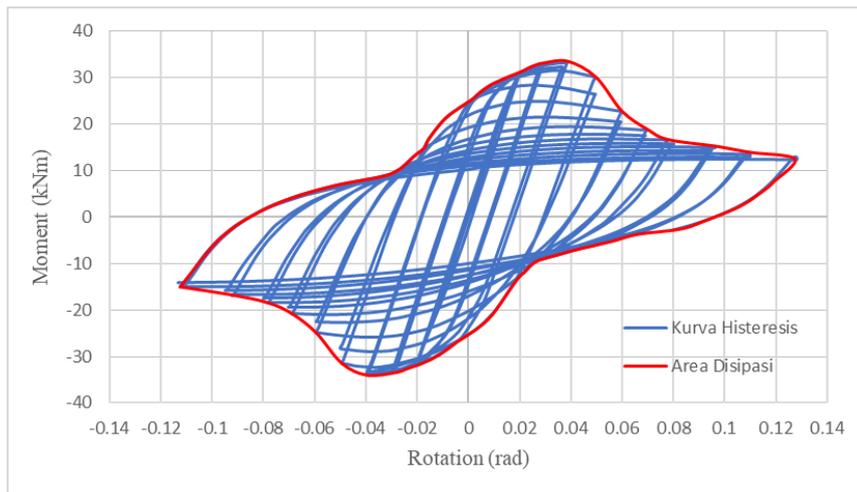


Gambar 4.29 Pola keruntuhan sambungan S3 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelelehan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.27. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelelehan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan

berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.27 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,03% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 5,4% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 2,66. Daktilitas pada spesimen S3 meningkat sebesar 13,61% terhadap spesimen S1.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S3 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S3 dapat dilihat pada Gambar 4.30, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 6,08 kNm-rad.



Gambar 4.30 Area disipasi energi spesimen S3

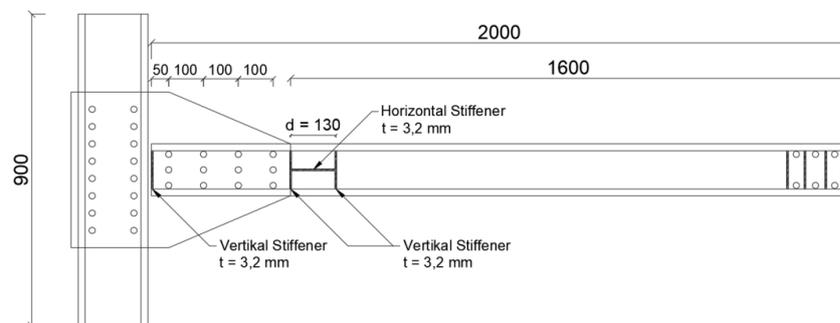
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S3, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kapasitas Spesimen Sambungan S3

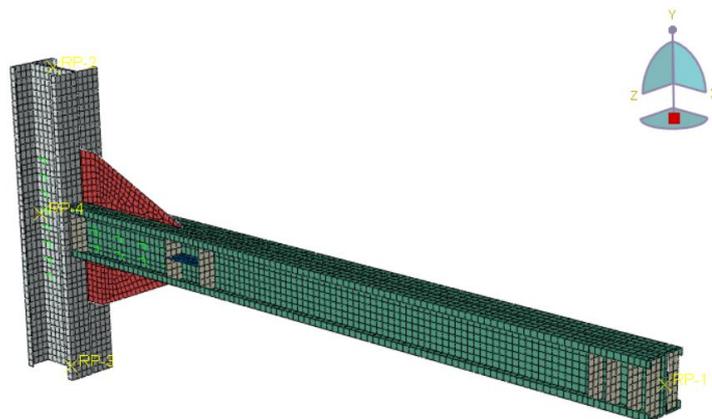
Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	34,158 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	34,12 kNm > 0,8 M_p =21,92 kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,109 rad
Daktilitas	2,66
Energi Disipasi	6,08 kNm-rad
Kekakuan Awal	1651,3 kNm/rad

4.5.4. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal dan 1 Horizontal Stiffener (S4)

Spesimen S4 merupakan kelanjutan dari spesimen S3 yang diberi perkuatan *stiffener* diantara dua *stiffener* didepan *gusset plate*. *Stiffener* tambahan yang digunakan adalah horizontal *stiffener*. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* spesimen S4 ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, vertikal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, horizontal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Penambahan horizontal *stiffener* bertujuan untuk menunda tekuk lokal pada badan dan sayap balok sehingga diharapkan perilaku sambungan menjadi lebih baik. Detail dari spesimen S1 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.31 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4.31 Detail 2D sambungan spesimen S4



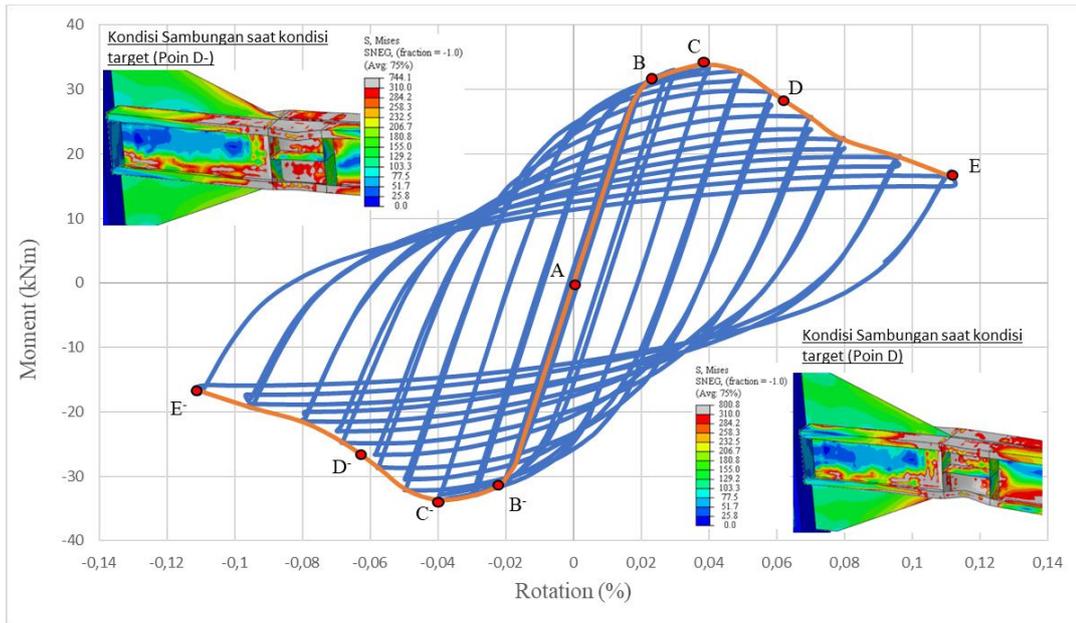
Gambar 4.32 Permodelan numerik 3D spesimen S4

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S4 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terprakualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

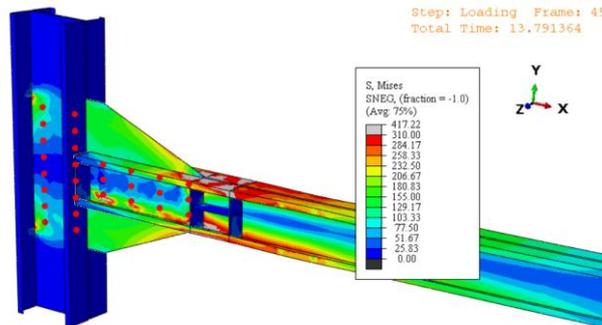
Kurva histeresis momen-rotasi (moment-rotation curve) spesimen S4 dapat dilihat pada gambar 4.33. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C⁻ merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D⁻ merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.33 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻.

Pada Gambar 4.33 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 3,89% rad yaitu dengan momen sebesar 33,85 kNm. Kapasitas sambungan S4 meningkat 4,57% terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 33,75 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92

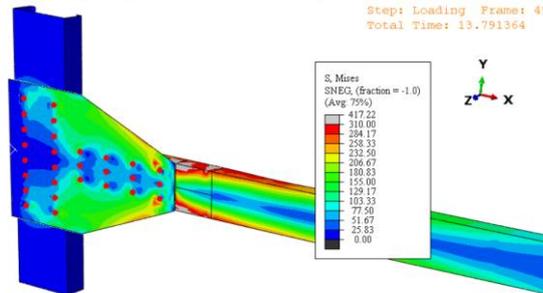
kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,53. Sehingga spesimen S4 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.35 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1622,8 kNm/rad.



Gambar 4.33 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S4



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom

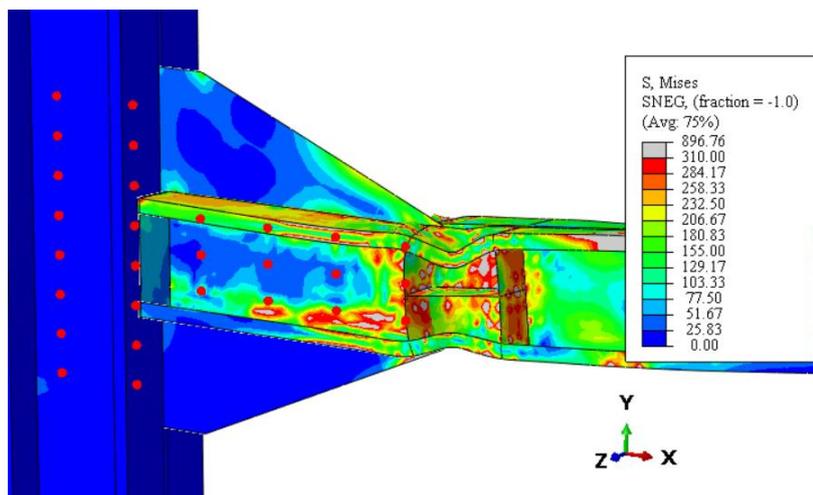


(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.34 Kondisi sambungan spesimen S4 saat terjadi pelelehan pertama

Pada gambar 4.34 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.34(a) dan tegangan pada gusset plate dapat dilihat pada Gambar 4.34(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan gusset plate terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 267,03 MPa dan 273,43 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S4 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.35. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan gusset plate. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-6 saat rotasi 2,17% rad, terjadi tekuk pada sayap didepan *gusset plate* kemudian terjadi tekuk dibelakang *gusset plate*. Selain itu akibat adanya horizontal *stiffener* tekuk pada badan balok tidak terjadi, akan tetapi tekuk pada balok berpindah kebelakang *gusset plate* (dibelakang *stiffener*). Tekuk ini makin membesar yang kemudian menyebabkan menurunnya kekakuan sambungan.

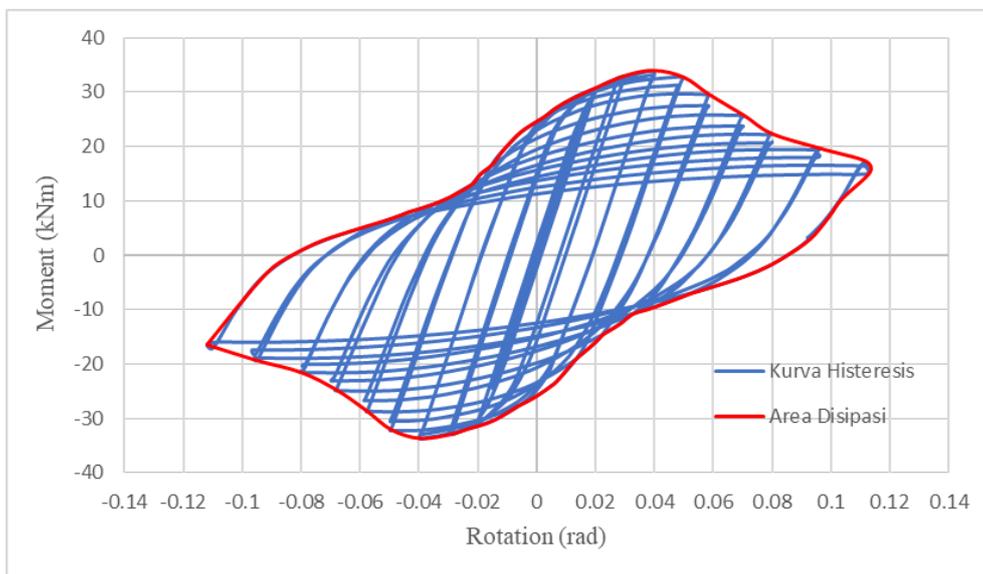


Gambar 4.35 Pola keruntuhan sambungan S4 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_i) terhadap rotasi saat pelelehan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.33. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan

mengalami pelelehan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.33 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,18% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 6,43% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 2,95.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S4 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S1 dapat dilihat pada Gambar 4.36, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 7,227 kNm-rad.



Gambar 4.36 Area disipasi energi spesimen S4

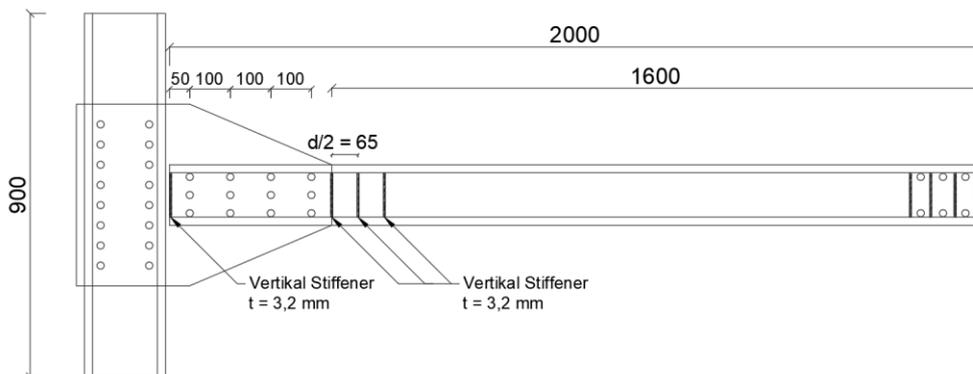
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S4, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Kapasitas Spesimen Sambungan S4

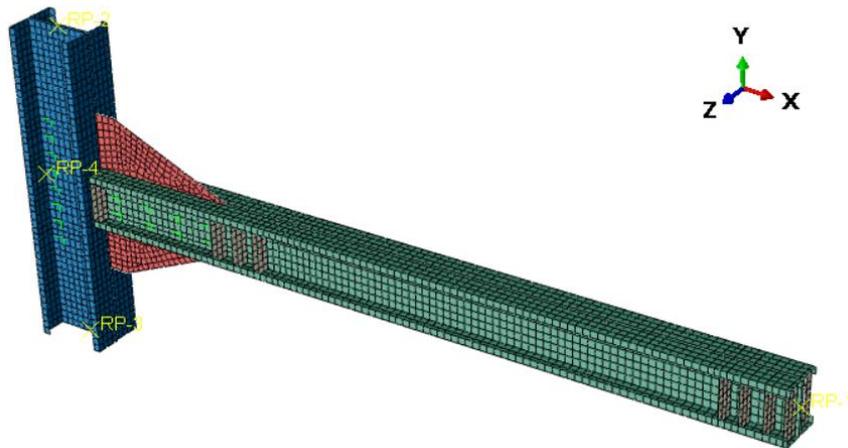
Kapasitas	Nilai
Momen Max (Mu)	33,85 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	33,75 kNm $>$ 0,8 Mp =21,92 kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,112 rad
Daktilitas	2,949
Energi Disipasi	7,227 kNm-rad
Kekakuan Awal	1622,8 kNm/rad

4.5.5. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 4 Vertikal Stiffener (S5)

Spesimen S5 merupakan kelanjutan dari spesimen S3 yang diberi perkuatan *stiffener* diantara dua *stiffener* didepan *gusset plate*. Berbeda halnya dengan spesimen S4, *stiffener* tambahan yang digunakan pada spesimen S5 adalah vertikal *stiffener*. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* spesimen S5 ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, gusset plate dengan ketebalan 6 mm, vertikal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Penambahan vertikal *stiffener* bertujuan untuk menunda tekuk lokal pada badan dan sayap balok sehingga diharapkan perilaku sambungan menjadi lebih baik. Detail dari spesimen S5 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.37 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.38.



Gambar 4.37 Detail 2D sambungan spesimen S5

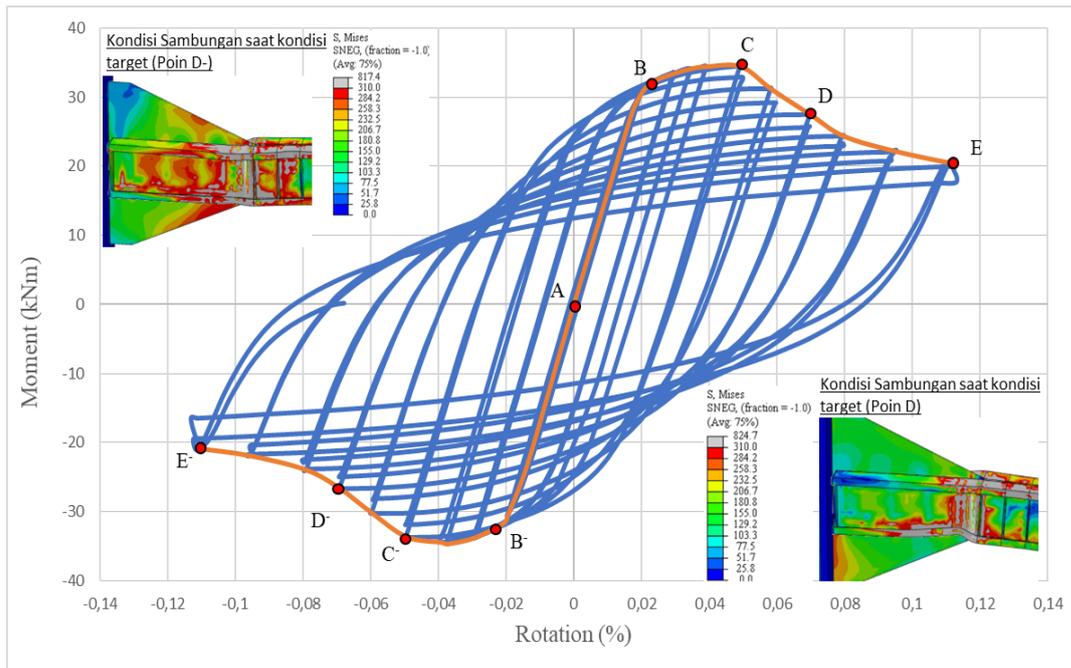


Gambar 4.38 Permodelan numerik 3D spesimen S5

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S5 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terprakualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

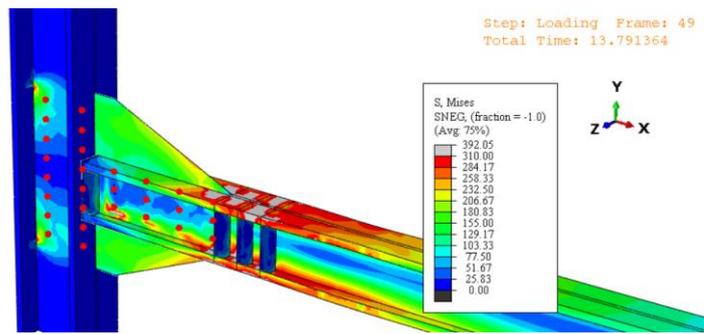
Kurva histeresis momen-rotasi (*moment-rotation curve*) spesimen S5 dapat dilihat pada gambar 4.39. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B' menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C' merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan

akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D' merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.39 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E'.

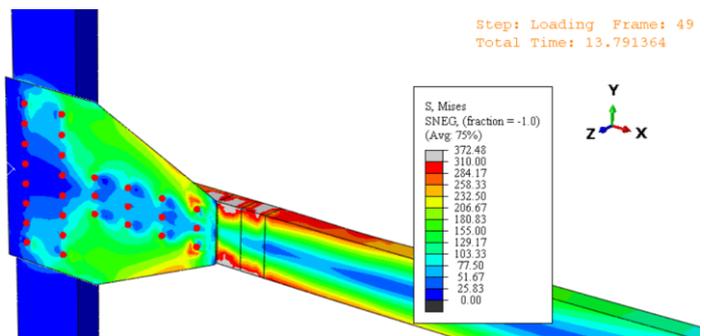


Gambar 4.39 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S5

Pada Gambar 4.39 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 3,76% rad yaitu dengan momen sebesar 34,51 kNm. Kapasitas sambungan S5 meningkat 6,58% terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 34,43 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,57. Sehingga spesimen S5 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.39 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1631,5 kNm/rad.



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom



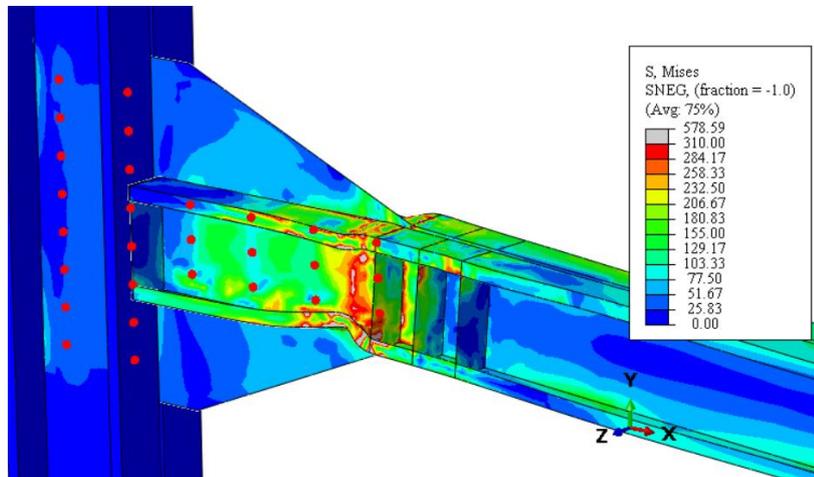
(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.40 Kondisi sambungan spesimen S5 saat terjadi pelelehan pertama

Pada gambar 4.40 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.40(a) dan tegangan pada *gusset plate* dapat dilihat pada Gambar 4.40(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan *gusset plate* terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 262,37 MPa dan 276,78 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S5 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.41. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan *gusset plate*. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-6 saat rotasi 2,23% rad, dimana tekuk terjadi pada sayap balok sebelum *gusset plate* kemudian berlanjut pada badan balok sebelum *gusset plate*. Penggunaan 3 vertikal *stiffener* didepan *gusset plate* menyebabkan tekuk berpindah dari depan *gusset plate*

menuju belakang *gusset plate*. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir.

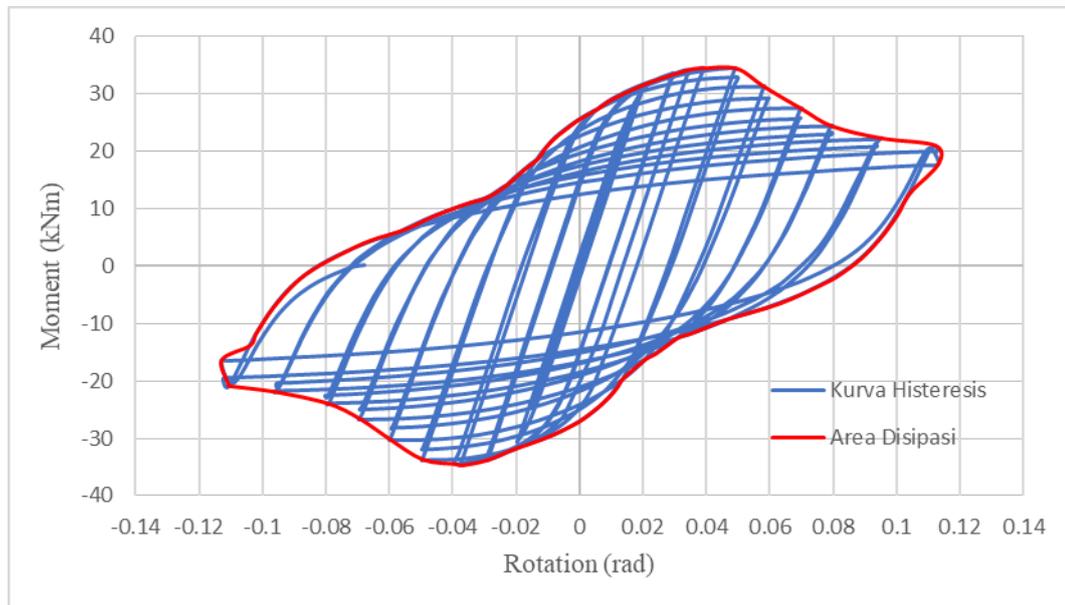


Gambar 4.41 Pola keruntuhan sambungan S5 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelepasan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.39. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelepasan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.39 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,11% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 7,02% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 3,32.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S5 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S5 dapat

dilihat pada Gambar 4.42, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 7,76 kNm-rad.



Gambar 4.42 Area disipasi energi spesimen S5

Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S5, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

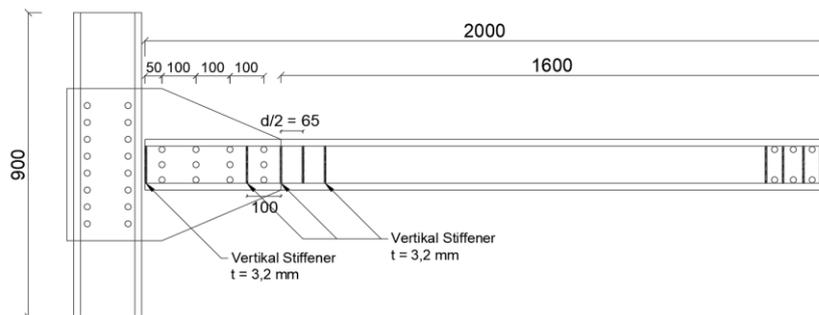
Tabel 4.5 Kapasitas Spesimen Sambungan S5

Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	34,51 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	34,43 kNm > $0,8 M_p = 21,92$ kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,113 rad
Daktilitas	3,32
Energi Disipasi	7,76 kNm-rad
Kekakuan Awal	1631,15 kNm/rad

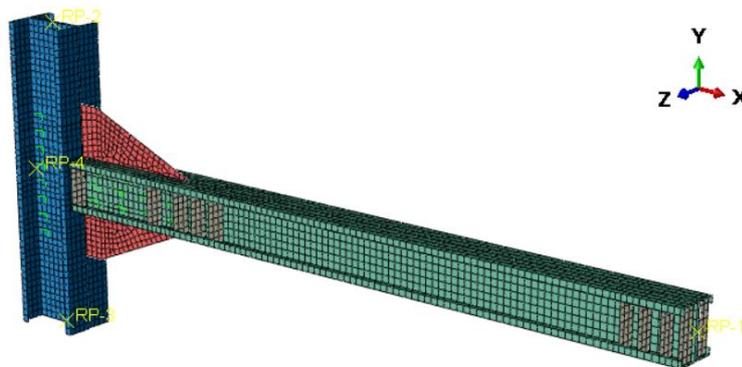
4.5.6. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 5 Vertikal Stiffener (S6)

Spesimen S6 merupakan kelanjutan dari spesimen S5 yang diberi perkuatan stiffener dibelakang gusset plate. Hal itu dikarenakan pada spesimen S5 tekuk terjadi pada sayap dan badan balok dibelakang gusset plate, sehingga pada daerah tersebut dipasang stiffener. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* spesimen S6 ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped*

channel 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, vertikal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Penambahan vertikal stiffener bertujuan untuk menunda tekuk lokal pada badan dan sayap balok sehingga diharapkan perilaku sambungan menjadi lebih baik. Detail dari spesimen S6 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.43 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.44.



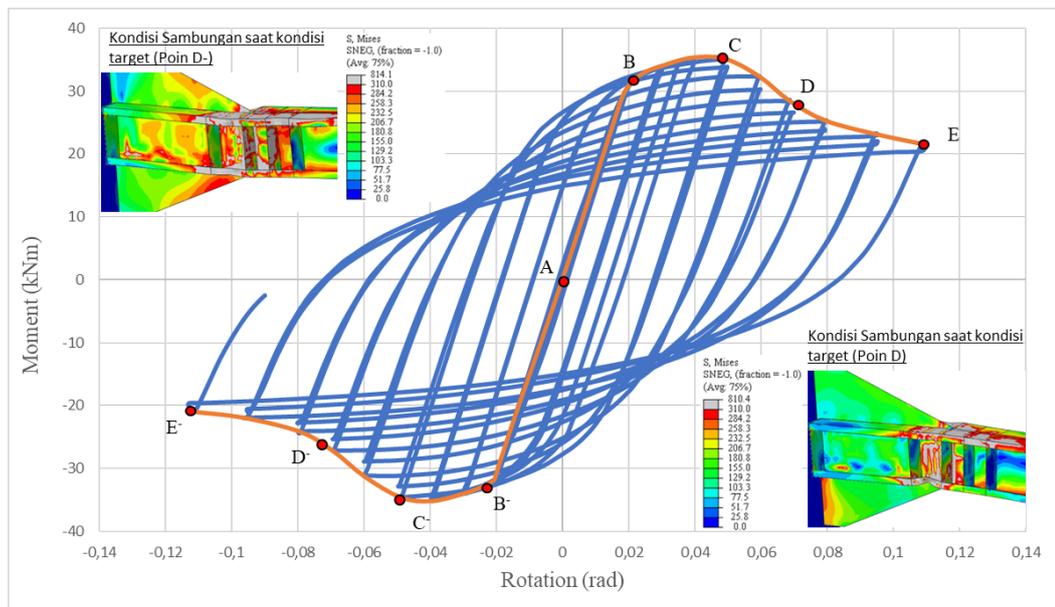
Gambar 4.43 Detail 2D sambungan spesimen S6



Gambar 4.44 Permodelan numerik 3D spesimen S6

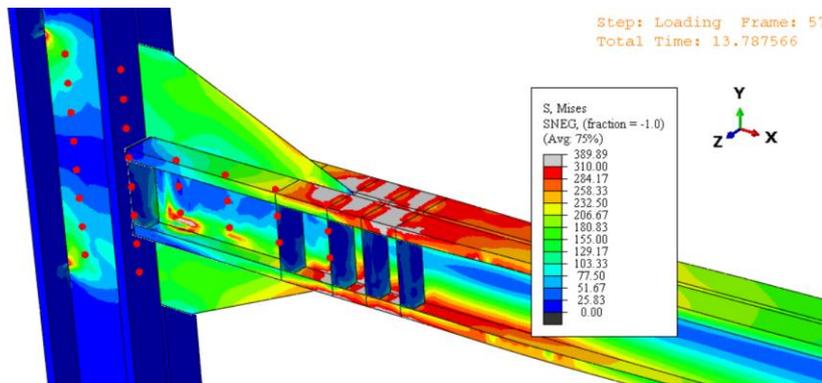
Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S6 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terpraktualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

Kurva histeresis momen-rotasi (moment-rotation curve) spesimen S6 dapat dilihat pada Gambar 4.45. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan gusset plate. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C⁻ merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D⁻ merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.45 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻.

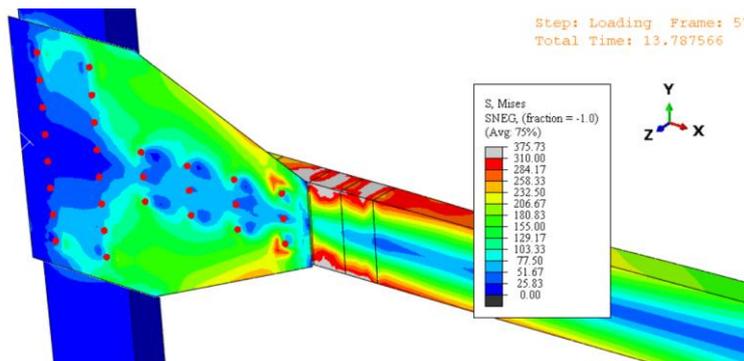


Gambar 4.45 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S6

Pada Gambar 4.45 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 4,91% rad yaitu dengan momen sebesar 35,16 kNm. Kapasitas sambungan S6 meningkat 8,59% terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 35,01 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,605. Sehingga spesimen S6 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.45 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1655,45 kNm/rad.



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom



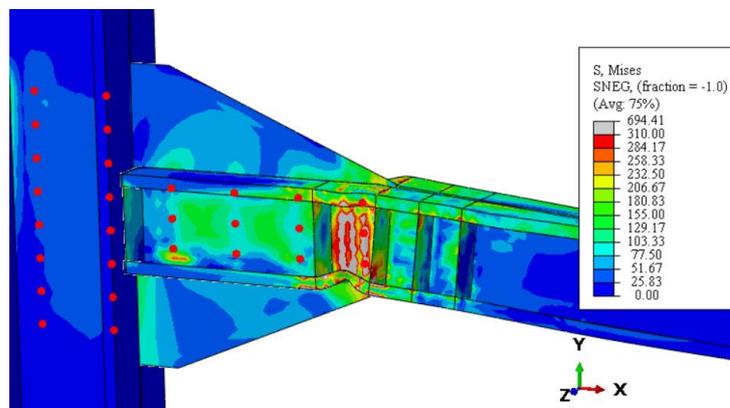
(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.46 Kondisi sambungan spesimen S6 saat terjadi pelelehan pertama

Pada gambar 4.46 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.46(a) dan tegangan pada gusset plate dapat dilihat pada Gambar 4.46(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan

yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan gusset plate terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 262,49 MPa dan 269,54 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S6 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.47. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok dibelakang *gusset plate*. Apabila dibandingkan dengan spesimen S5 tekuk yang terjadi pada spesimen S6 terlihat pada rotasi yang relatif lebih besar yaitu pada siklus ke-7 saat rotasi 2,77% rad. Sehingga dapat dikatakan bahwa *stiffener* berhasil menunda tekuk pada balok. Selanjutnya tekuk pada sayap dan badan balok menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir.

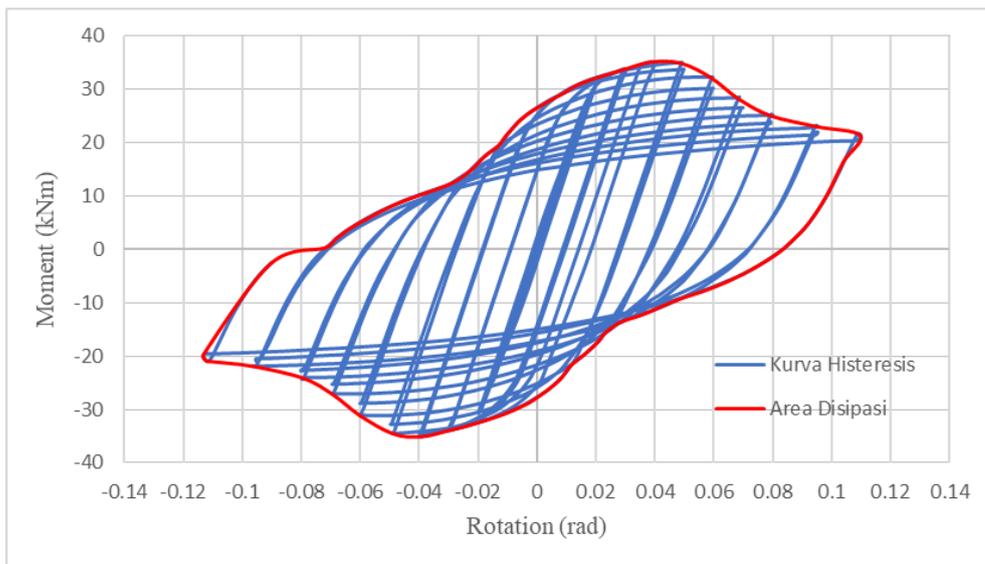


Gambar 4.47 Pola keruntuhan sambungan S6 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelelehan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada gambar 4.45. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelelehan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan

berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.45 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,11% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 7,1% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 3,36.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S6 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S6 dapat dilihat pada gambar 4.48, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 7,78 kNm-rad.



Gambar 4.48 Area disipasi energi spesimen S6

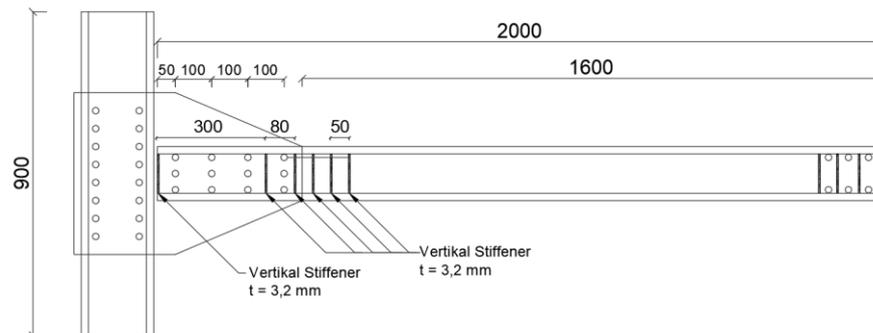
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S6, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kapasitas Spesimen Sambungan S6

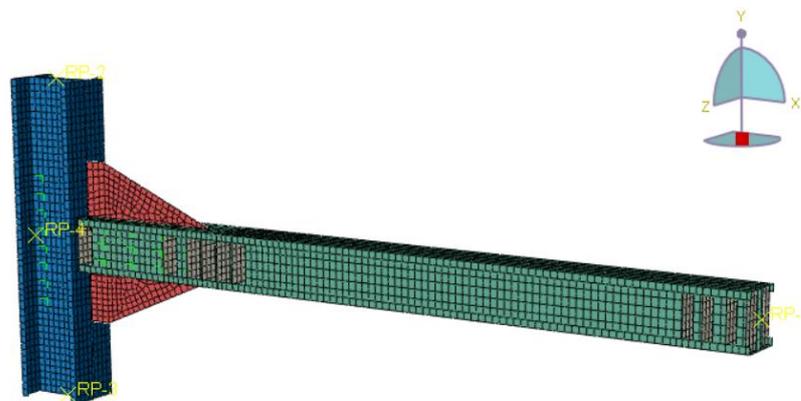
Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	35,16 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	35,01 kNm > 0,8 M_p =21,92 kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,113 rad
Daktilitas	3,36
Energi Disipasi	7,78 kNm-rad
Kekakuan Awal	1655,45 kNm/rad

4.5.7. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 6 Vertikal Stiffener (S7)

Spesimen S7 merupakan sambungan spesimen S6 yang diperkuat dengan menambahkan vertikal *stiffener* pada daerah terjadinya tekuk di spesimen S6, sehingga vertikal *stiffener* yang dipasang berjumlah 6. Konfigurasi ini dipilih dengan hipotesis bahwa tekuk dapat tertunda, sehingga dapat diperoleh perilaku sambungan yang lebih baik dari spesimen S6. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* spesimen S7 ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, vertikal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Penambahan X stiffener diharapkan menciptakan perilaku sambungan yang lebih baik. Detail dari spesimen S7 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.49 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.50.

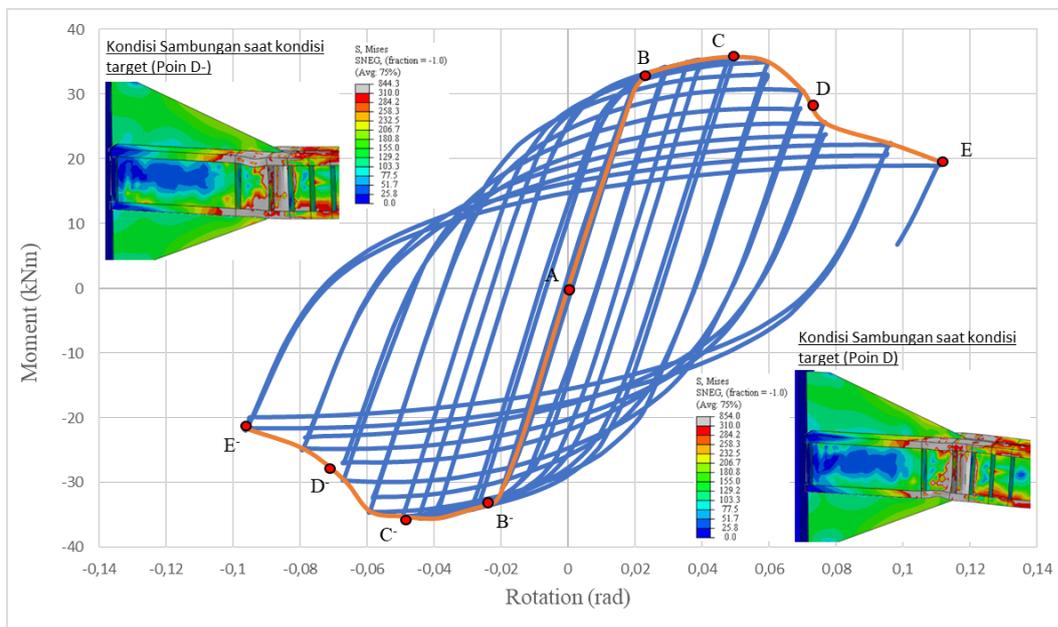


Gambar 4.49 Detail 2D sambungan spesimen S7



Gambar 4.50 Permodelan numerik 3D spesimen S7

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S7 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terprakualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.



Gambar 4.51 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S7

Kurva histeresis momen-rotasi (moment-rotation curve) spesimen S8 dapat dilihat pada Gambar 4.51. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B⁻ menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan

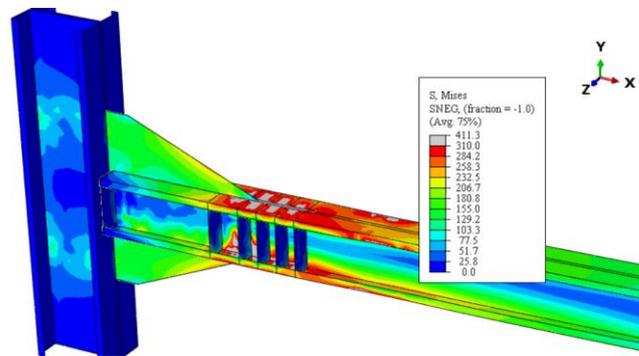
leleh. Poin C dan C' merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D' merupakan 80% momen dari momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.51 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E'.

Pada Gambar 4.51 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 5% rad yaitu dengan momen sebesar 35,767 kNm. Kapasitas sambungan S7 meningkat 10,46 % terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 35,26 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,608. Sehingga spesimen S7 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.51 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1632,13 kNm/rad.

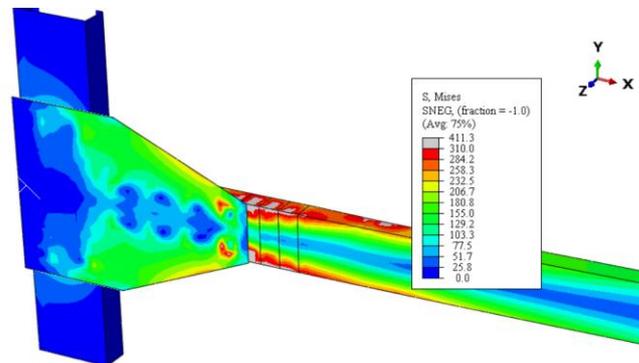
Pada gambar 4.52 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.52(a) dan tegangan pada *gusset plate* dapat dilihat pada Gambar 4.52(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu pada *gusset plate* terdapat konsentrasi tegangan yang besar yaitu 296 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S7 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada gambar 4.53. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan *gusset plate*. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-8 saat rotasi 1,98% rad, dimana tekuk terjadi pada sayap balok kemudian berlanjut pada badan balok. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat

pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir.

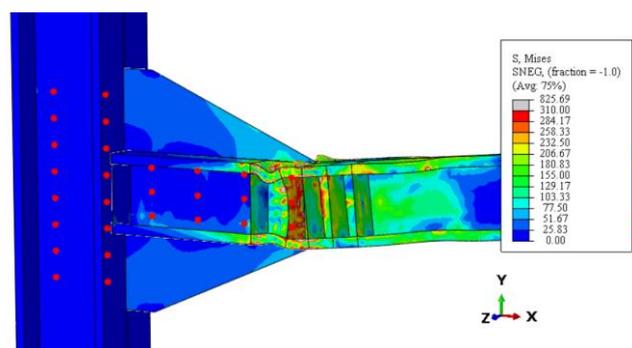


(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom



(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.52 Kondisi sambungan spesimen S7 saat terjadi pelelehan pertama

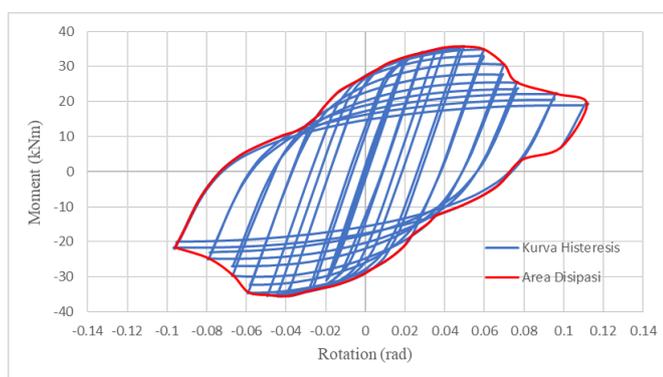


Gambar 4.53 Pola keruntuhan sambungan S7 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelelehan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada gambar 4.51. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelelehan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan

berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari gambar 4.51 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,11% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 7,26% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 3,44.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S7 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S7 dapat dilihat pada Gambar 4.54, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 7,81 kNm-rad.



Gambar 4.54 Energi disipasi spesimen S7

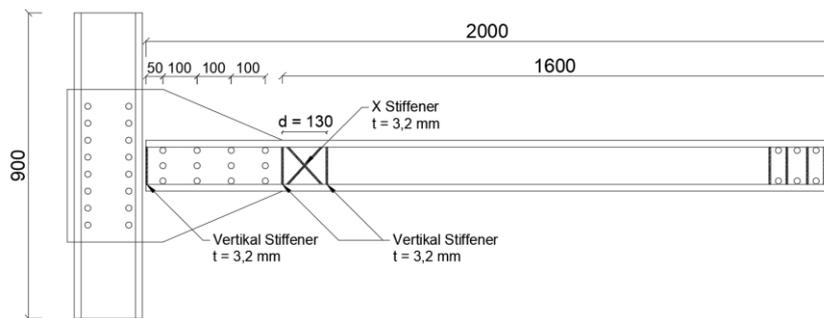
Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S7, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kapasitas Spesimen Sambungan S7

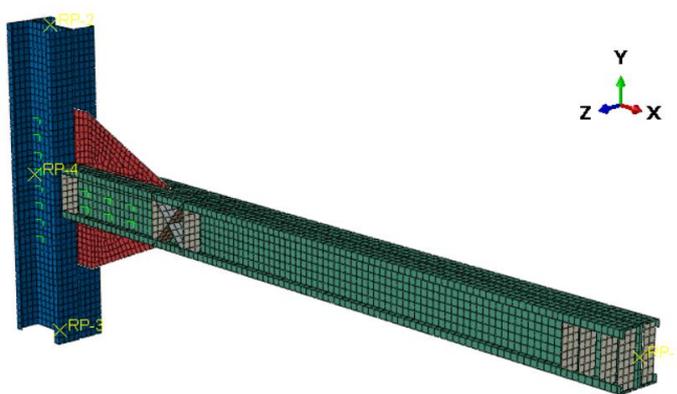
Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	35,767 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	35,26 kNm > 0,8 M_p =21,92 kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,112 rad
Daktilitas	3,44
Energi Disipasi	7,81 kNm-rad
Kekakuan Awal	1632,13 kNm/rad

4.5.8. Analisis Spesimen Sambungan Dengan 3 Vertikal dan X Stiffener (S8)

Spesimen S8 merupakan spesimen dengan bentuk konfigurasi stiffener X, konfigurasi ini dipilih agar stiffener mampu memikul gaya tekan dan tarik dari balok akibat beban siklik. Sambungan balok-kolom baja *cold-formed* ini terdiri dari elemen balok dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 150 x 60 x 20 mm, kolom dengan profil *double-back-to-back lipped channel* 200 x 75 x 20 mm, *gusset plate* dengan ketebalan 6 mm, vertikal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, diagonal *stiffener* dengan ketebalan 3,2 mm, dan baut dengan diameter 18 mm yang dimodelkan sebagai *point based fastener* di Abaqus. Penambahan X *stiffener* diharapkan menciptakan perilaku sambungan yang lebih baik. Detail dari spesimen S1 secara 2D dapat dilihat pada Gambar 4.55 dan permodelan 3D pada program Abaqus dapat dilihat pada Gambar 4.56.



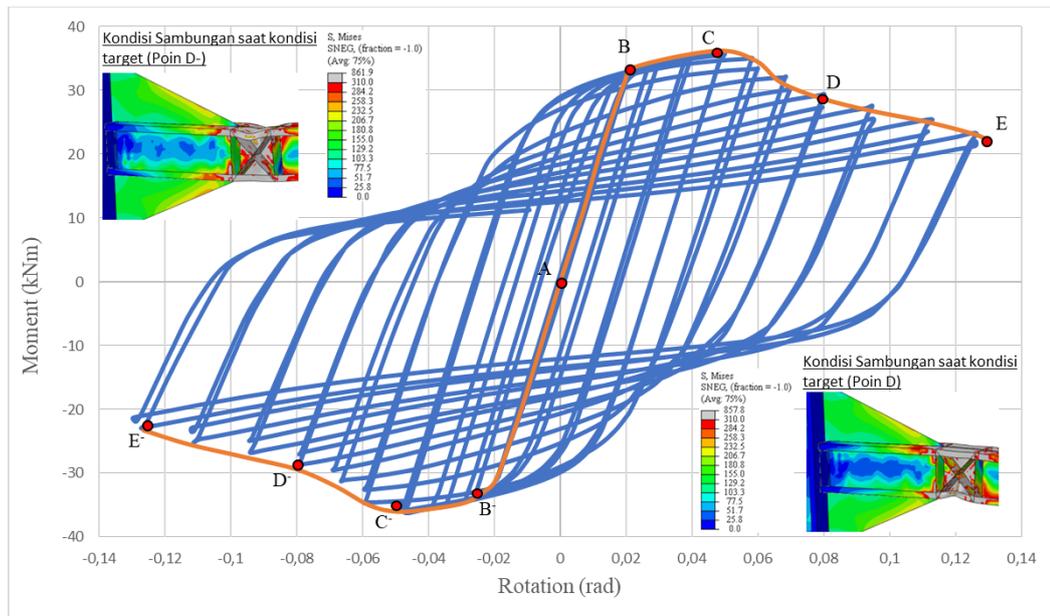
Gambar 4.55 Detail 2D sambungan spesimen S8



Gambar 4.56 Permodelan numerik 3D spesimen S8

Output hasil analisis numerik dari permodelan spesimen S8 berupa kurva histeresis, pola keruntuhan, dan tegangan yang terjadi pada elemen sambungan. Pola keruntuhan akan ditinjau dari tegangan von-mises dan pola deformasi pada

elemen-elemen sambungan. Selain itu dari output analisis numerik akan dibahas mengenai kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi dari sambungan, serta akan ditinjau pula mengenai kualifikasi dari sambungan sesuai dengan persyaratan sambungan terpraktualifikasi AISC 341-16 section E3.6b, yaitu dengan mengetahui kapasitas momen dimuka kolom saat rotasi 4% rad.

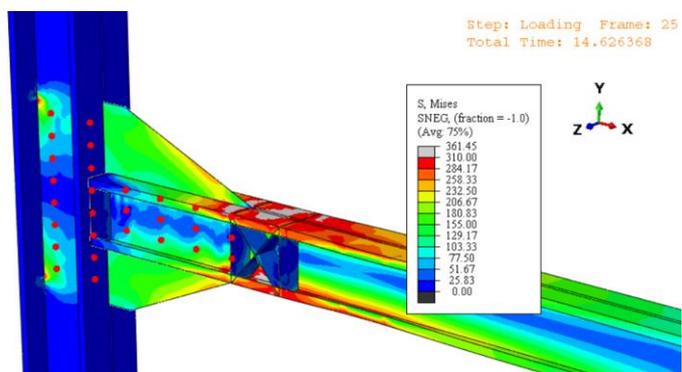


Gambar 4.57 Kurva histeresis momen-rotasi spesimen S8

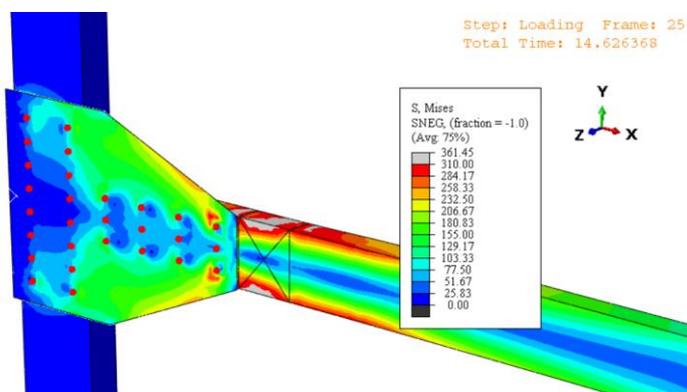
Kurva histeresis momen-rotasi (*moment-rotation curve*) spesimen S8 dapat dilihat pada Gambar 4.57. Kurva ini diperoleh dari output program Abaqus berupa reaksi momen dan displacement akibat pembebanan siklik diujung balok. Momen yang diambil berada didepan muka kolom lebih tepatnya didepan *gusset plate*. Kemudian data momen dan displacement diolah menjadi kurva momen rotasi. Dari kurva momen-rotasi tersebut dapat diamati 4 zona yang berbeda berdasarkan perilaku yang dapat diidentifikasi yaitu : (i) Zona elastis (AB): pada zona ini perilaku sambungan masih bersifat elastis dimana tegangan yang bekerja belum mencapai tegangan lelehnya yaitu 310 MPa. Poin B dan B' menandai berakhirnya fase elastis dan dimulainya fase inelastis. (ii) Zona inelastis (BC) : Pada fase ini terjadi pelelehan pada balok dimana tegangan sudah mencapai tegangan leleh. Poin C dan C' merupakan kapasitas momen maksimum dari sambungan. (iii) Zona postbuckling (CD): Pada zona ini dapat diamati terjadi penurunan kekakuan akibat tekuk yang mulai terinisiasi. Poin D dan D' merupakan 80% momen dari

momen maksimum sambungan, dimana pada Gambar 4.57 terdapat kondisi tegangan sambungan saat mengalami kondisi target atau saat kapasitas sambungan menjadi 80% dari kapasitas maksimumnya yaitu pada poin D. (iv) zona kegagalan (DE): pada zona ini terjadi kegagalan sambungan pada poin E dan E⁻.

Pada gambar 4.57 dapat diketahui kapasitas momen maksimum sambungan terjadi saat poin C, saat rotasi mencapai 4,69% rad yaitu dengan momen sebesar 36,153 kNm. Kapasitas sambungan S8 meningkat 11,66% terhadap spesimen S1. Setelah itu terjadi penurunan kekakuan akibat munculnya tekuk pada sayap balok. Sedangkan saat terjadi rotasi 4% rad kapasitas momen balok adalah 35,54 kNm, dimana telah melampaui dari 80% momen plastis balok yaitu sebesar 21,92 kNm. Rasio antara momen yang terjadi saat rotasi 4% rad dan 80% momen plastis balok adalah 1,62. Sehingga spesimen S8 memenuhi persyaratan sambungan *Special Moment Frame* (SMF) berdasarkan AISC 341-16. Selain itu dapat dihitung nilai tangen dari kurva histeresis saat fase elastis dari Gambar 4.57 nilai kekakuan awal dari sambungan adalah 1630,19 kNm/rad.



(a) Tegangan von-mises pada balok dan kolom

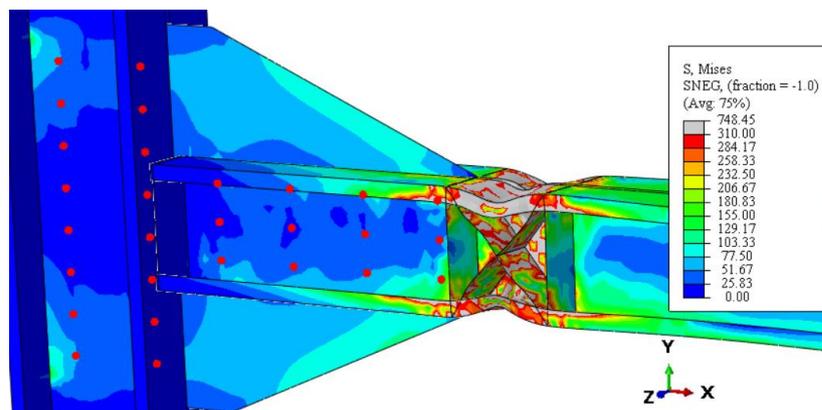


(b) Tegangan von-mises gusset plate

Gambar 4.58 Kondisi sambungan spesimen S8 saat terjadi pelelehan pertama

Pada Gambar 4.58 dapat diamati kondisi sambungan saat terjadi pelelehan pertama. Tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.58(a) dan tegangan pada gusset plate dapat dilihat pada Gambar 4.58(b). Daerah sambungan yang mengalami pelelehan adalah daerah dengan warna abu-abu dimana tegangan yang terjadi telah melebihi tegangan leleh yaitu 310 MPa. Dapat dilihat bahwa pelelehan terjadi pada balok terlebih dahulu dibagian sayap dan badan, sementara itu meskipun pada kolom dan *gusset plate* terdapat konsentrasi tegangan yang besar masing masing adalah 264,43 MPa dan 283,93 MPa secara keseluruhan kondisi dari elemen tersebut tetap elastis.

Pada spesimen S8 perilaku rotasi didominasi oleh perilaku lentur dan tekuk lokal pada balok. Pola kegagalan sambungan pada akhir fase pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 4.59. Diakhir fase pembebanan terjadi tekuk pada sayap dan badan balok didepan gusset plate. Tekuk mulai terinisiasi pada siklus ke-8 saat rotasi 3,24% rad, dimana tekuk terjadi pada sayap balok kemudian berlanjut pada badan balok. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan sambungan yang berakibat pada turunnya kapasitas momen sambungan secara berkelanjutan hingga fase pembebanan berakhir.

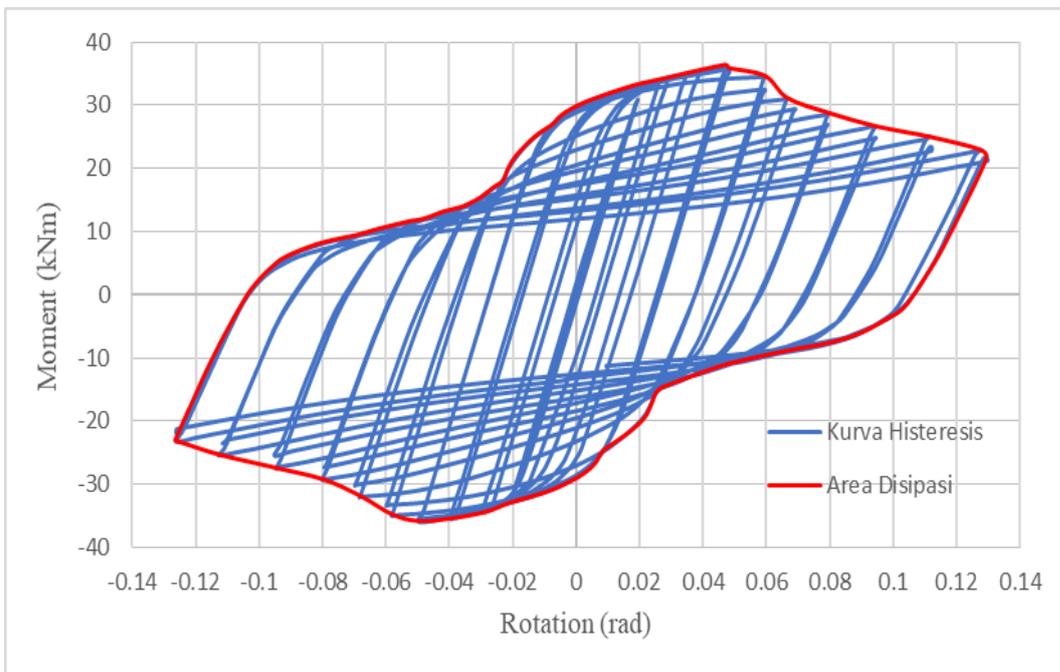


Gambar 4.59 Pola keruntuhan sambungan S8 pada akhir fase pembebanan

Daktilitas sambungan dapat ditentukan dengan menghitung rasio dari target rotasi (θ_t) terhadap rotasi saat pelelehan pertama (θ_y) dari kurva momen rotasi sambungan pada Gambar 4.57. Rotasi saat leleh (θ_y) ditentukan saat sambungan mengalami pelelehan pertama pada poin B. Rotasi target (θ_t) ditentukan berdasarkan kinerja yang diharapkan dari sambungan. Umumnya diasumsikan

bahwa rotasi target adalah rotasi maksimum yang berkaitan dengan hilangnya berapa persen kekuatan dari kekuatan maksimum sambungan. Dalam studi ini, rotasi target ditentukan sebagai rotasi dimana kapasitas momen dari sambungan berkurang 20% sebagaimana direkomendasikan oleh AISC 341-16. Sehingga ditentukan bahwa rotasi target terdapat pada poin D. Dari Gambar 4.57 didapatkan bahwa rotasi saat leleh (θ_y) pada poin B adalah 2,11% rad dan rotasi target (θ_t) pada poin D adalah 7,86% rad sehingga daktilitas yang mana merupakan rasio rotasi target terhadap rotasi saat leleh adalah 3,725.

Gempa menginduksikan energi ke sistem struktur rangka pemikul momen dimana energi tersebut umumnya didisipasi oleh balok melalui deformasi plastis. Besar disipasi energi dari sambungan S8 dapat diestimasi dengan menghitung luasan dari kurva momen-rotasi sambungan. Energi disipasi sambungan S8 dapat dilihat pada Gambar 4.60, dimana area disipasi adalah area didalam garis merah. Didapatkan energi disipasi sambungan adalah 10 kNm-rad.



Gambar 4.60 Pola keruntuhan sambungan S8 pada akhir fase pembebanan

Dari analisis dan pembahasan sebelumnya mengenai perilaku spesimen S8, secara ringkas kapasitas dari sambungan dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Kapasitas Spesimen Sambungan S8

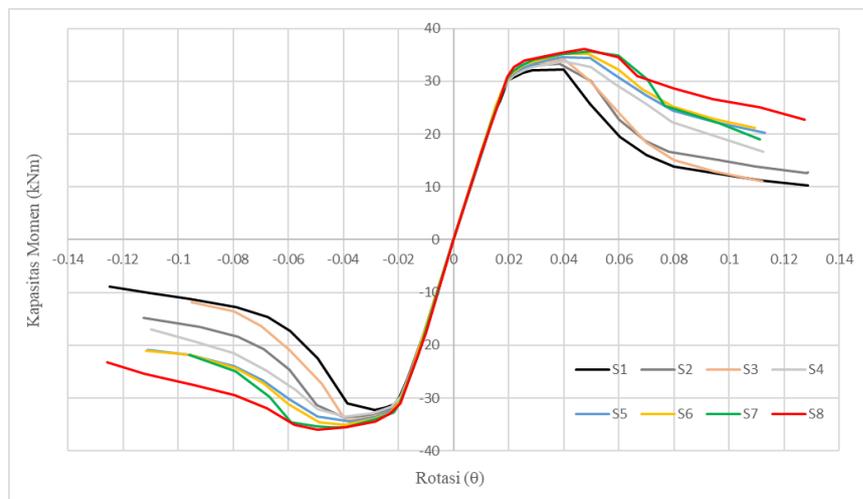
Kapasitas	Nilai
Momen Max (M_u)	36,15 kNm
Momen saat $\theta = 0,04$ rad	35,54 kNm > $0,8 M_p = 21,92$ kNm...(OK)
Rotasi maksimum	0,13 rad
Daktilitas	3,72
Energi Disipasi	10 kNm-rad
Kekakuan Awal	1630,9 kNm/rad

4.6. Interpretasi Hasil Analisis

Dalam subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan perilaku dari spesimen sambungan. Perilaku yang dibandingkan adalah kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi. Dari perbandingan tersebut akan ditentukan sambungan mana yang memiliki perilaku yang terbaik.

a. Perbandingan *backbone curve*

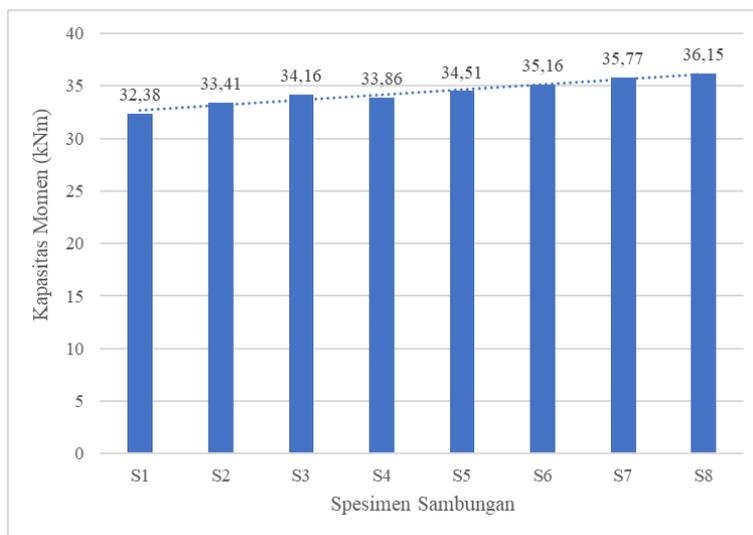
Pengaruh penggunaan *stiffener* dengan konfigurasi yang berbeda terhadap perilaku histeresis yang disajikan dalam bentuk *backbone curve* dapat dilihat pada Gambar 4.61. Dapat dilihat bahwa spesimen sambungan S1 memiliki kurva *backbone* yang paling rendah dari spesimen lainnya, kurva *backbone* semakin meningkat seiring bertambahnya *stiffner* yang dipasang pada balok. Dapat diamati bahwa spesimen S8 yaitu spesimen dengan konfigurasi *stiffener* berupa X stiffner memiliki kurva dengan puncak tertinggi dan rotasi yang relatif lebih panjang dari spesimen lain dengan perkuatan stiffener.



Gambar 4.61 Perbandingan kapasitas momen sambungan

b. Perbandingan kapasitas momen sambungan

Kapasitas momen dari tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada Gambar 4.62. Dapat diamati bahwa spesimen S1 yang mana merupakan spesimen yang belum diberi *stiffener* memiliki kapasitas yang terkecil dari model lainnya, yaitu sebesar 32,41 kNm. Sedangkan spesimen S8 memiliki kapasitas momen terbesar dari model lain, yaitu sebesar 36,15 kNm. Peningkatan dari setiap spesimen terhadap spesimen S1 dan terhadap spesimen sebelumnya secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 4.9. Spesimen S8 dengan konfigurasi X *stiffener* mampu memberikan peningkatan kapasitas momen yang cukup signifikan dari kelima model sambungan lainnya yang diperkuat yaitu dengan peningkatan sebesar 11,66% terhadap spesimen S1. Hal tersebut dikarenakan *stiffener* X berkontribusi dalam menahan tekan dan tarik pada balok saat beban siklik berlangsung yang berefek pada peningkatan kapasitas momen pada sambungan. Sementara itu spesimen S2, S3, S4, S5, S6, dan S7 memiliki kapasitas momen yang relatif sama masing- masing sebesar 33,41 kNm; 34,16 kNm; 33,86 kNm; 34,51 kNm; 35,16 kNm, dan 35,77 kNm. Akan tetapi dapat diamati pada Gambar 4.62 bahwa selisih kapasitas momen dari kedelapan spesimen tidak terlalu besar sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan *stiffener* pada balok tidak memberikan penambahan kapasitas momen yang signifikan. Walaupun demikian trend peningkatan kapasitas momen yang dapat dilihat pada Gambar 4.62 menunjukkan bahwa *stiffener* dapat meningkatkan tahanan tekuk dari elemen.



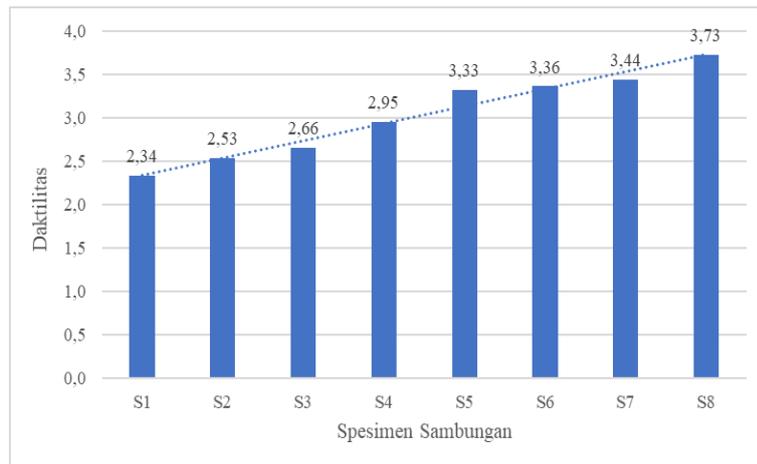
Gambar 4.62 Perbandingan kapasitas momen sambungan

Tabel 4.9 Presentase peningkatan kapasitas momen tiap spesimen

Spesimen	Momen Max (kNm)	Peningkatan Terhadap S1 (%)	Peningkatan Terhadap Spesimen Sebelumnya (%)
S1	32,378	0,000	-
S2	33,410	3,190	3,190
S3	34,158	5,499	2,238
S4	33,857	4,570	-0,880
S5	34,511	6,589	1,930
S6	35,162	8,600	1,887
S7	35,768	10,469	1,722
S8	36,153	11,660	1,078

c. Perbandingan daktilitas sambungan

Daktilitas dari tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada Gambar 4.63. Dapat diamati bahwa spesimen S1 memiliki daktilitas yang terkecil dari model lainnya, yaitu sebesar 2,341. Sedangkan spesimen S8 memiliki daktilitas terbesar dari ketujuh model lain, yaitu sebesar 3,725. Peningkatan daktilitas dari setiap spesimen terhadap spesimen S1 dan terhadap spesimen sebelumnya secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 4.10. Spesimen S8 dengan konfigurasi *X stiffener* mampu memberikan peningkatan daktilitas yang signifikan dari model sambungan lainnya yang diperkuat yaitu dengan peningkatan sebesar 59,109% terhadap spesimen S1. Nilai daktilitas yang tinggi pada spesimen S8 merupakan efek dari *stiffener X* yang berkontribusi dalam menahan tekan dan tarik yang terjadi pada balok, sehingga tekuk lokal pada sayap dan badan balok dapat tertunda dan perilaku sambungan menjadi lebih stabil pasca terjadi momen puncak yang ditunjukkan dengan rotasi sambungan pada saat 80% kapasitas momen yang lebih besar jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Sementara itu dapat diamati bahwa *trend* dari grafik histogram pada Gambar 4.63 adalah nilai daktilitas cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *stiffener* pada sambungan. Hal ini menunjukkan bahwa *stiffener* mampu menunda tekuk lokal pada balok sehingga didapatkan nilai daktilitas dari sambungan meningkat.



Gambar 4.63 Perbandingan daktilitas sambungan

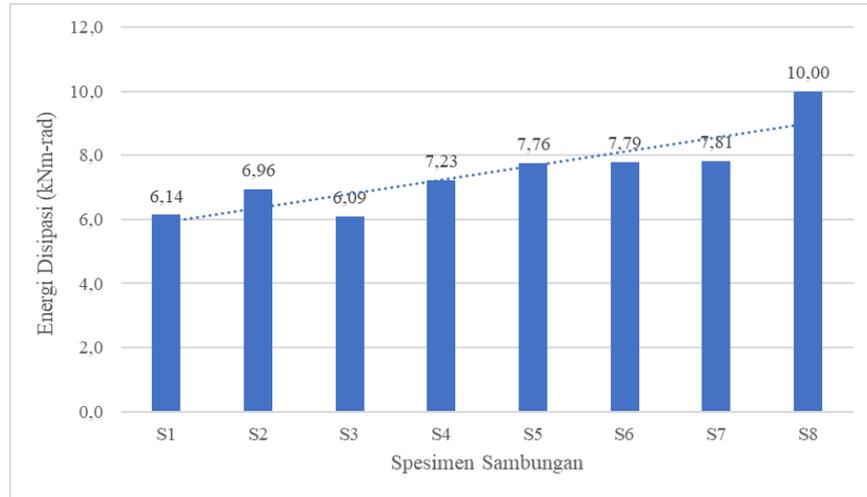
Tabel 4.10 Presentase peningkatan daktilitas tiap spesimen

Spesimen	Daktilitas	Peningkatan Terhadap S1 (%)	Peningkatan Terhadap Spesimen Sebelumnya (%)
S1	2,341	0,000	-
S2	2,535	8,258	8,258
S3	2,660	13,620	4,953
S4	2,950	25,982	10,881
S5	3,327	42,105	12,798
S6	3,365	43,725	1,140
S7	3,441	46,964	2,254
S8	3,725	59,109	8,264

d. Perbandingan disipasi energi sambungan

Energi disipasi dari tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada gambar 4.64. Dapat diamati bahwa spesimen S1 memiliki kapasitas energi disipasi yang terkecil dari keenam model lainnya, yaitu sebesar 4,75 kNm-rad. Sedangkan spesimen S8 memiliki kapasitas energi disipasi terbesar dari keenam model lain, yaitu sebesar 6,54 kNm-rad. Peningkatan energi disipasi dari setiap spesimen terhadap spesimen S1 dan terhadap spesimen sebelumnya secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 4.11. Spesimen S8 dengan konfigurasi X *stiffener* mampu memberikan peningkatan energi disipasi yang cukup signifikan dari kelima model sambungan lainnya yang diperkuat yaitu dengan peningkatan sebesar 37,69% terhadap spesimen S1. Penggunaan *stiffener* X memberikan perilaku histeresis yang

lebih stabil dan kurva yang lebih gemuk akibat kontribusi *stiffener* X dalam menahan gaya tekan dan tarik pada balok akibat beban siklik.



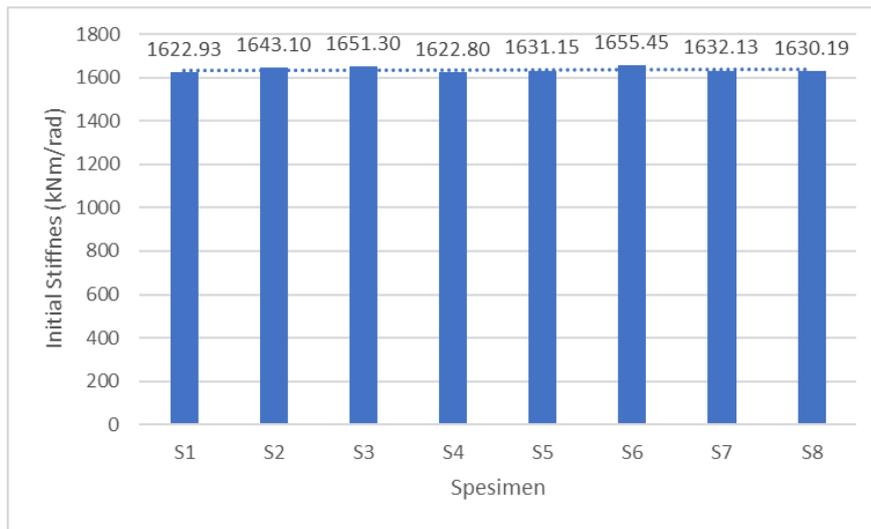
Gambar 4.64 Perbandingan energi disipasi sambungan

Tabel 4.11 Presentase peningkatan energi disipas tiap spesimen

Spesimen	Energi Disipasi (kNm-rad)	Peningkatan Terhadap S1 (%)	Peningkatan Terhadap Spesimen Sebelumnya (%)
S1	6,141	0,000	-
S2	6,955	13,260	13,260
S3	6,085	-0,903	-12,505
S4	7,228	17,701	18,773
S5	7,762	26,394	7,386
S6	7,790	26,856	0,366
S7	7,814	27,247	0,308
S8	10,000	62,842	27,974

e. Evaluasi kekakuan awal sambungan

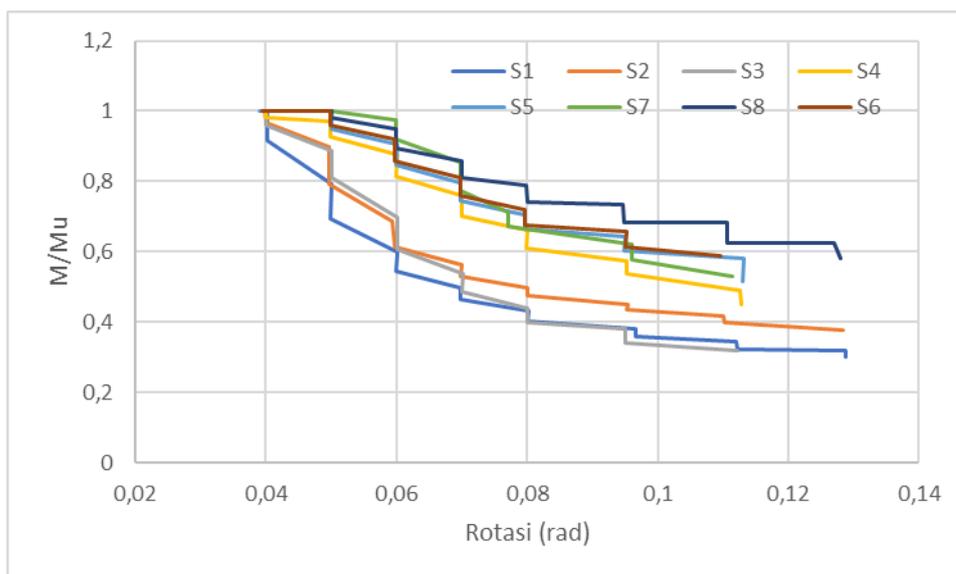
Nilai kekakuan awal rotasional dari tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada Gambar 4.65. Nilai kekuan awal dari sambungan dapat diperoleh dengan menghitung nilai tangen dari kurva backbone saat difase elastis. Dapat diamati pada Gambar 4.65 trend nilai kekakuan dari tiap spesimen sambungan cenderung sama yaitu dengan nilai rata-rata kekakuan sebesar 1636,13 kNm/rad. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan *stiffener* tidak berpengaruh terhadap kekakuan awal sambungan.



Gambar 4.65 Perbandingan *initial stiffness* sambungan

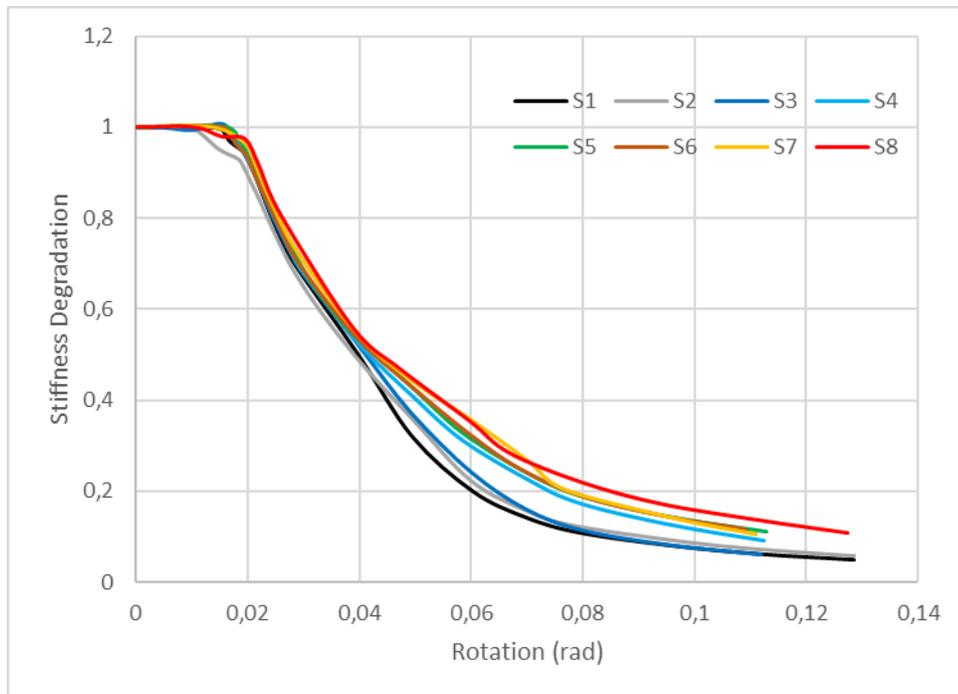
f. Analisis penurunan kekuatan dan kekakuan sambungan

Grafik penurunan kekuatan tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada Gambar 4.66. Dapat diamati bahwa spesimen S1 mengalami penurunan kapasitas momen yang relatif besar dari spesimen lain yaitu pada rotasi 0,04 rad dan 0,05 rad. Dapat diamati penurunan semakin kecil seiring penambahan *stiffener* pada sambungan. Didapatkan spesimen S8 memiliki penurunan yang terkecil pada tiap rotasi jika dibandingkan dengan sambungan lainnya, hanya pada rotasi ke 0,06 rad penurunan kapasitas momen spesimen S7 lebih kecil dari spesimen S8.



Gambar 4.66 Penurunan kekuatan sambungan

Grafik penurunan kekakuan dari tiap spesimen sambungan dapat dilihat pada Gambar 4.74. Setelah terjadi pelelehan, kekakuan dari sambungan mengalami penurunan seiring tekuk membesar. Dari Gambar 4.67 penurunan kekakuan terendah terjadi pada spesimen S1. Penurunan kekakuan dari sambungan semakin berkurang dan kekakuan semakin meningkat seiring bertambahnya *stiffener* yang dipasang. Hal ini menunjukkan bahwa tertundanya tekuk akibat pemasangan *stiffener* dapat mencegah penurunan kekakuan yang signifikan dari sambungan. Dapat dilihat pada Gambar 4.74 spesimen S8 dengan konfigurasi stiffener berbentuk X memiliki rasio kekakuan yang paling baik dari spesimen lainnya.



Gambar 4.67 Penurunan kekakuan sambungan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Permodelan numerik model validasi cukup baik dalam mensimulasikan perilaku histeresis sambungan sesuai dengan tes eksperimental, dimana momen maksimum sambungan pada analisis numerik dan pengetesan eksperimental masing-masing adalah 0,75Mp dan 0,81Mp dengan selisih 7,06%. Selisih tersebut dapat diakibatkan oleh perbedaan *geometric imperfection* dan material antara permodelan numerik dan tes eksperimental. Kapasitas momen yang lebih rendah pada hasil analisis numerik menunjukkan bahwa permodelan dapat menghasilkan hasil analisis yang lebih konservatif. Selain itu didapatkan pula bahwa model numerik dapat mensimulasikan dengan baik perilaku rotasi sambungan balok-kolom dan dapat memprediksi bentuk umum dan lokasi tekuk lokal/distorsi pada sambungan balok-kolom.
2. Konfigurasi *stiffener* dengan bentuk X (S8) menghasilkan perilaku sambungan yang optimal dari konfigurasi lainnya. Spesimen S8 memiliki kapasitas momen terbesar dari keenam model lain, yaitu sebesar 36,153 kNm dengan peningkatan sebesar 11,66 % terhadap spesimen S1. Spesimen S8 dengan konfigurasi X *stiffener* mampu memberikan peningkatan kapasitas momen yang cukup signifikan dari model sambungan lainnya. Spesimen S8 memiliki daktilitas terbesar dari model lain, yaitu sebesar 3,725. Spesimen S8 dengan konfigurasi X *stiffener* mampu memberikan peningkatan daktilitas yang signifikan dari kelima model sambungan lainnya yang diperkuat yaitu dengan peningkatan sebesar 59,109% terhadap spesimen S1. Spesimen S8 memiliki kapasitas energi disipasi terbesar dari keenam model lain, yaitu sebesar 10 kNm-rad. Spesimen S8 dengan konfigurasi X *stiffener* mampu memberikan peningkatan energi disipasi yang cukup signifikan dari kelima model sambungan lainnya yang diperkuat yaitu dengan peningkatan sebesar 62,842% terhadap spesimen S1.

3. Penambahan *stiffener* pada balok tidak memberikan penambahan kapasitas momen yang signifikan. Walaupun demikian peningkatan kapasitas momen dari sambungan dengan *stiffener* menunjukkan bahwa *stiffener* dapat meningkatkan tahanan tekuk dari elemen. Nilai daktilitas cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *stiffener* pada sambungan. Hal ini menunjukkan bahwa *stiffener* mampu menunda tekuk lokal pada balok sehingga didapatkan nilai daktilitas dari sambungan meningkat. Dari hasil analisis penambahan *stiffener* menghasilkan *trend* peningkatan energi disipasi dari sambungan. Selain itu penambahan *stiffener* menunda tekuk yang terjadi pada balok sehingga perilaku sambungan mengalami peningkatan seiring bertambahnya jumlah *stiffener* yang dipasang.

5.2. Saran

1. Perlu dilakukan pengujian eksperimental untuk mengetahui kinerja sambungan yang sebenarnya.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan *stiffener* dan ketebalan pelat *gusset plate* terhadap perilaku sambungan seperti kapasitas momen, daktilitas, dan energi disipasi.
3. Perlu dilakukan studi lebih lanjut terhadap sambungan balok-kolom baja *cold-formed* di arah transversal.

DAFTAR PUSTAKA

- AISI S400 (2015) *North American Standard for Seismic Design of Cold-Formed Steel Structural Systems*.
- ANSI/AISC 341-05 (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.
- ANSI/AISC 341-16 (2016) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Available at: www.aisc.org.
- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2011a) “Ductile moment-resisting frames using cold-formed steel sections: An analytical investigation,” *Journal of Constructional Steel Research*, 67(4), pp. 634–646. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.016>.
- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2011b) “Ductile moment-resisting frames using cold-formed steel sections: An analytical investigation,” *Journal of Constructional Steel Research*, 67(4), pp. 634–646. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.016>.
- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2012a) “Development of cold-formed steel elements for earthquake resistant moment frame buildings,” *Thin-Walled Structures*, 53, pp. 99–108. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.004>.
- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2012b) “Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings,” *Engineering Structures*, 42, pp. 371–386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.025>.
- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2012c) “Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings,” *Engineering Structures*, 42, pp. 371–386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.025>.

- Bagheri Sabbagh, A. *et al.* (2013) “Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip,” *Journal of Constructional Steel Research*, 80, pp. 100–108. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.010>.
- Billah, M.M., Islam, R. and Bin, A. (2019) “Cold formed steel structure: An overview.” Available at: www.worldscientificnews.com.
- Calderoni, B. *et al.* (2009) “Cold formed steel beams under monotonic and cyclic loading: Experimental investigation,” *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), pp. 219–227. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.014>.
- Chen, M., Huo, J.-H. and Xing, Y.-W. (2020) “Seismic Behavior of Cold-Formed Steel Frames with Bolted Moment Connections,” *Journal of Structural Engineering*, 146(3), p. 04019212. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002538](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002538).
- Chung, K.F. and Lau, L. (1999) “Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members,” *Engineering Structures*, 21(10), pp. 898–911. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00043-1).
- Fiorino, L. *et al.* (2016) “Seismic Design Method for CFS Diagonal Strap-Braced Stud Walls: Experimental Validation,” *Journal of Structural Engineering*, 142(3), p. 04015154. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001408](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001408).
- Foster, P. *et al.* (2016) “Finite element modelling of cyclic behaviour of cold-formed steel bolted moment-resisting connections,” *Journal of Construction in Developing Countries*, 21(1), pp. 167–180. Available at: <https://doi.org/10.21315/jcdc2016.21.1.9>.
- Kaling, V.N., Patil, S.M. and Hosur, V.I. (2015) “Study on Partially Restrained Connections of Cold Form Steel Structures,” 3(04), pp. 3253–3257.

- Kasaeian, S. *et al.* (2020) “Seismic performance of CFS strap-braced walls using capacity-based design approach,” *Journal of Constructional Steel Research*, 174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106317>.
- Komara, I., Wahyuni, E. and Suprobo, P. (2017) “A study on Cold-formed Steel Frame Connection: A review,” *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 28(3). Available at: <https://doi.org/10.12962/j20882033.v28i3.3223>.
- Landolfo, R. (2011) “Cold-Formed Steel Structures in Seismic Area : Research and Applications,” *VIII Congresso de Construção Metálica e Mista, Guimarães*, pp. 3–22.
- Liu, P., Peterman, K.D. and Schafer, B.W. (2014) “Impact of construction details on OSB-sheathed cold-formed steel framed shear walls,” *Journal of Constructional Steel Research*, 101, pp. 114–123. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.003>.
- Macillo, V., Fiorino, L. and Landolfo, R. (2017) “Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests,” *Thin-Walled Structures*, 120(August), pp. 161–171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>.
- Mazzolani, Federico M *et al.* (2019) *COLD-FORMED STEEL STRUCTURES: ADVANCES IN RESEARCH AND DESIGN*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/265453535>.
- Nadya, R.U.K. and Usman, F. (2018) “Bolted connection of cold-formed steel section - A review,” *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(17), pp. 4737–4745.
- Ryu, H.W. *et al.* (2018) “Determination of Combined Hardening Parameters to Simulate Deformation Behavior of C(T) Specimen under Cyclic Loading,” in *Procedia Structural Integrity*. Elsevier B.V., pp. 1932–1939. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.268>.

- Sato, A. and Uang, C.-M.M. (2008) “Cold-Formed Steel Special Bolted Moment Frames: Capacity Design Requirements,” ... *Specialty Conference on Cold-Formed Steel ...*, (January 2008), pp. 1–12.
- Tartaglia, R. *et al.* (2018) “Full strength extended stiffened end-plate joints: AISC vs recent European design criteria,” *Engineering Structures*, 159, pp. 155–171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.053>.
- Uang, C.M. *et al.* (2008) “Cyclic testing and modeling of cold-formed steel-special bolted moment frame connections,” *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders*, 314(August), pp. 953–960. Available at: [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)62](https://doi.org/10.1061/41016(314)62).
- Vallabhy, S. *et al.* (2008) “BUCKLING BEHAVIOUR OF COLD FORMED STEEL SECTIONS,” *International Research Journal of Engineering and Technology* [Preprint]. Available at: www.irjet.net.
- Ye, J. *et al.* (2016) “Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending,” *Thin-Walled Structures*, 101, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.021>.
- Ye, J. *et al.* (2018) “Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending,” *Engineering Structures*, 161(January), pp. 55–67. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.070>.
- Ye, J. *et al.* (2020) “Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames,” *Thin-Walled Structures*, 150(July 2018), p. 105926. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>.
- Ye, J., Mojtabaei, S.M. and Hajirasouliha, I. (2019a) *Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism*, *Journal of Constructional Steel Research*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.013>.

- Ye, J., Mojtabaei, S.M. and Hajirasouliha, I. (2019b) “Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism,” *Journal of Constructional Steel Research*, 156, pp. 122–136. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.013>.
- Yu, C. (2010) “Shear resistance of cold-formed steel framed shear walls with 0.686 mm, 0.762 mm, and 0.838 mm steel sheet sheathing,” *Engineering Structures*, 32(6), pp. 1522–1529. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.029>.

BIODATA PENULIS



Muhamad Fauzan Akbari

Lahir di Surabaya, 22 April 1999, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Tembok Dukuh Surabaya, SMP Negeri 3 Surabaya, dan SMA Negeri 2 Surabaya. Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan pendidikan program sarjana (S1) di Departemen Teknik Sipil ITS pada tahun 2017 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan.

Saat sedang menjalani pendidikan S1, penulis melanjutkan pendidikan program pascasarjana (S2) di Departemen Teknik Sipil ITS pada tahun 2021 dengan beasiswa *fasttrack* dan terdaftar dengan NRP 6012211071. Pada studi pascasarjana, penulis mengambil topik thesis bidang struktur dengan judul “**Analisis Nonlinear Sambungan Balok-Kolom Baja Cold-Formed Pada Hunian Tetap Its Yang Tahan Gempa**”.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur atas terselesaikannya tesis ini. Apabila pembaca ingin berdiskusi lebih lanjut dengan penulis dapat menghubungi melalui email : fauzan.mfa22@gmail.com